

Московский Государственный Университет им. М. В. Ломоносова
Государственный Астрономический Институт им. П. К. Штернберга

На правах рукописи
УДК 524.7/524.82

Золотухин Иван Юрьевич

**МНОГОВОЛНОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕДКИХ
АСТРОФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
БОЛЬШИХ МАССИВОВ ДАННЫХ**

Специальность: 01.03.02 – астрофизика, звездная астрономия

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Научный консультант:
д.ф.-м.н. Чилингарян И.В.

Москва – 2016

Оглавление

Введение	4
1 Каталоги и базы данных астрофизических объектов	18
1.1 Каталог RCSED распределений энергии в спектрах галактик	21
1.1.1 Устройство каталога	22
1.1.2 Фотометрические свойства выборки	32
1.1.3 Спектральные свойства выборки	37
1.1.4 Доступ к каталогу: веб-сайт и интерфейсы Виртуальной Обсерватории	48
1.1.5 Подготовка каталога: SQL-запрос	52
1.1.6 Заключение	55
1.2 Третий каталог рентгеновских источников <i>XMM-Newton</i>	57
1.2.1 Наблюдения, вошедшие в каталог	58
1.2.2 Обработка данных	60
1.2.3 Создание каталога: уникальные объекты	60
1.2.4 Фотонная база данных	62
2 Исследования рентгеновских источников	64
2.1 Обнаружение новой катаклизмической переменной звезды AX J194939+2631 с помощью Виртуальной Обсерватории	67
2.1.1 Идентификация объекта AX J194939+2631	67
2.1.2 Дополнительные данные	70
2.1.3 Обсуждение	75
2.2 Соотношение период–светимость для постоянных LMXB в ближнем ИК диа- пазоне	77
2.2.1 Распределение энергии в спектре LMXB в оптическом и ближнем ИК диапазонах	77
2.2.2 Используемые данные	79
2.2.3 Соотношение $M_K - \Sigma_K$ для постоянных LMXB	85
2.2.4 Резюме	91
2.3 Постоянные рентгеновские источники в балдже Галактики. Физические ограничения из Виртуальной Обсерватории. Выборка I	92
2.3.1 Используемые данные	93
2.3.2 Наблюдения и результаты	94
2.3.3 Резюме	101
2.4 Постоянные рентгеновские источники в балдже Галактики. Физические ограничения из Виртуальной Обсерватории. Выборка II	103

2.4.1	Использованные данные	103
2.4.2	Наблюдения и результаты	104
2.4.3	Резюме	120
3	Нормальные и компактные галактики	122
3.1	Универсальное соотношение цвет–цвет–звездная величина для галактик в оптическом и УФ диапазоне	123
3.1.1	Фотометрическая выборка галактик в УФ и оптическом диапазоне	124
3.1.2	Соотношение цвет–цвет–величина и его свойства	127
3.1.3	Обсуждение	133
3.1.4	Резюме	143
3.1.5	Проверка результата	144
3.1.6	Аппроксимация поверхностью сильно неоднородных трехмерных массивов данных с большим разбросом	146
3.1.7	Соотношения цвет–цвет–величина при различных комбинациях цветов	146
3.2	Изолированные компактные эллиптические галактики: сбежавшие звездные системы	151
3.2.1	Отбор кандидатов в сЕ	158
3.2.2	Свойства финальной выборки сЕ галактик	162
4	Поиск редких астрофизических объектов	166
4.1	Гипер-яркие рентгеновские источники	169
4.1.1	Создание выборки	170
4.1.2	Анализ данных	177
4.1.3	Результаты	180
4.1.4	Обсуждение	184
4.1.5	Выводы	189
4.1.6	Подробности построения выборки	189
4.2	Самый медленный пульсар в шаровом скоплении	191
4.2.1	Метод поиска пульсаций: “фабрика пульсаров”	192
4.2.2	Обнаружение пульсаций и орбитальные параметры двойной системы	194
4.2.3	Детальный анализ временных рядов	196
4.2.4	Спектральный анализ	197
4.2.5	Обсуждение	200
4.2.6	Выводы	211
4.2.7	Тонкий поиск периода пульсаций и анализ ошибок для техники сложения эпох	212
	Заключение	217

Введение

В последние десятилетия астрофизика переживает цифровую революцию. С появлением приборов с зарядовой связью (ПЗС) качественно изменились не только сами наблюдательные данные, но и темпы роста их объема. Вслед за увеличением количества элементов на ПЗС объем получаемых в астрономических наблюдениях данных стал расти со скоростью самых быстрых технологических метрик — например, закона Мура экспоненциального роста производительности компьютерных процессоров (см., например, [Ekers, 2010](#)). Таким образом, примерно каждые два года телескопы всего мира получают столько же данных, сколько за всю историю астрономических наблюдений до этого.

Такая скорость получения наблюдательных данных требует новых методов работы с ними (например, [Borne, 2009](#)). Цифровые приемники стали многоволновыми. Процессы обработки цифровых наблюдательных данных и массового измерения наблюдаемых величин для большого числа небесных объектов в них удалось алгоритмизировать. Существенная часть наблюдательных программ выполняется в виде публично доступных обзоров, анализировать которые предлагается всем желающим. Благодаря этому количество занесенных в каталоги астрофизических объектов с измеренными наблюдаемыми параметрами растет точно такими же постоянно увеличивающимися темпами. При этом размер мирового астрономического сообщества меняется гораздо медленнее, удваиваясь каждые 15 лет¹. Тем самым количество объектов для анализа в многоволновых астрономических каталогах в пересчете на каждого астронома увеличивается с экспоненциальной скоростью.

Эти количественные перемены влекут за собой важные качественные изменения в процессе астрофизических исследований, использующих наблюдательные данные (например, [Borne et al., 2009](#)). Появилась и бурно развивается дисциплина “наука данных” (*data science*) или астрономия с интенсивным использованием данных (*data intensive astronomy*), связанная с извлечением астрофизических фактов из больших массивов информации (*big data*). Настоящая диссертация выполнена именно в парадигме *data science*, в которой возможности для новых астрофизических выводов ищутся в имеющемся ландшафте публично доступных многоволновых астрономических данных. Более того, практически вся диссертация, кроме единственного исследования, представленного в первой части Главы 2, выполнена без привлечения новых наблюдательных данных только лишь на основании существовавшей ранее публично доступной информации — архивных данных наблюдений или же больших многоволновых цифровых обзоров неба. Такой подход повторного использования данных для решения ранее не предусмотренных задач, несомненно, повышает эффективность научного процесса, в том числе экономическую.

Важным компонентом оптимизации научных исследований со всевозрастающим потоком данных является *Виртуальная Обсерватория* (ВО) — международная инициатива по

¹По данным библиографической базы данных NASA ADS <http://adsabs.harvard.edu>

стандартизации форматов данных, рутинных операций доступа к ним и задействованного при этом программного обеспечения — как со стороны центров астрономических данных, так и со стороны ученого-пользователя (Zolotukhin, 2009b). Широкая стандартизация этапов работы с данными в астрономии означает, например, возможность использования одних и тех же методов работы с информацией из различных диапазонов спектра. По своей сути ВО выделяет из различных дисциплин астрономии единообразные операции и снижает издержки на их повторное использование в других областях науки, создавая тем самым синергетический эффект и открывая широкую перспективу для междисциплинарного подхода, автоматизации научных исследований и масштабирования их на новые, все большие массивы объектов. Методы работы с данными в ВО сыграли ключевую роль при работе над всеми без исключения главами настоящей диссертации. Тем самым одним из важных свойств работы является возможность повторять описанные исследования в будущем, масштабируя их на новые данные больших объемов.

Общая логика процесса исследований, вошедших в настоящую диссертацию, состоит в следующем. На первом этапе создается большой массив однородных данных — каталог астрофизических объектов, рассчитанный на самую широкую тематику исследований. Затем к нему организуются гибкие механизмы доступа — как программные веб-сервисы, совместимые с ВО-стандартами для массового анализа, так и удобные веб-сайты для более детального изучения отдельных объектов в ручном режиме. Далее формулируется конкретная астрофизическая задача, которую оказывается возможно решить с учетом созданного массива данных. На последнем, основном этапе разрабатывается последовательность шагов по анализу данных с учетом подключения новых коллекций информации в ВО — как правило, из других диапазонов длины волны. Этот анализ всей совокупности данных завершается астрофизическими выводами.

Первая крупная подборка научных результатов, полученных с помощью Виртуальной Обсерватории, была представлена в кандидатской диссертации автора (Zolotukhin, 2009b). Затем в докторской диссертации Chilingarian (2010) было существенно углублено и расширено применение методов Виртуальной Обсерватории во внегалактической астрономии.

Настоящая диссертация, таким образом, продолжает эту серию работ с использованием Виртуальной Обсерватории, распространяя ее на новые задачи астрофизики. Предметом интереса в ней стали несколько разных типов рентгеновских источников, а также нормальные (неактивные) и компактные галактики. Ниже мы по отдельности обрисовываем положение дел и задачи, стоящие на повестке в этих дисциплинах астрофизики.

Галактики — это массивные гравитационно связанные системы, состоящие из звезд, продуктов их эволюции, межзвездной среды (в виде газа и пыли) и темной материи. Их наблюдательные проявления чрезвычайно разнообразны; распределение масс галактик простирается приблизительно от 10^7 масс Солнца в карликах до 10^{14} масс Солнца в гигантских галактиках.

Одним из наиболее интересных классов карликовых галактик являются компактные эллиптические галактики (compact elliptical, cE), характеризующиеся небольшими размерами и высокими плотностями звезд, похожие по своим свойствам на M32, спутник галактики Андромеды (Faber, 1973). Их богатые металлами звездные населения драматическим образом отличаются от населений других карликовых галактик и больше напоминают звезды массивных эллиптических галактик ранних типов. Это обстоятельство способствовало появлению идеи, что cE галактики сформировались путем приливного

обдирания из более массивных прародителей, хотя в литературе обсуждаются и альтернативные сценарии, например формирование сЕ через иерархические слияния (Paudel et al., 2014). Компактные эллиптические галактики очень редки: до настоящей диссертации было известно порядка 25 объектов (Chilingarian et al., 2009a). В соответствии с принятой стратегией их поиска, опирающегося на сценарий их формирования путем приливного обдирания, все эти галактики были найдены в богатых скоплениях галактик вблизи гигантских галактик в их центрах (например, Mieske et al., 2005; Price et al., 2009). Спор о сценариях происхождения сЕ стал особенно острым после случайного открытия изолированной сЕ галактики вдали от сколько-нибудь существенного гравитационного влияния массивных соседей (Huxor et al., 2013). Однако проблема их происхождения может быть разрешена только после того, как удастся выполнить поиск сЕ галактик, свободный от эффектов селекции, привязанных к окружению, что и стало одной из целей настоящей диссертации.

В этом контексте интересно также отметить недавнее открытие сверхмассивной черной дыры (supermassive black hole, SMBH) в сЕ галактике (Paudel et al., 2016), которое перекликается с активными поисками центральных черных дыр в ядрах карликовых галактик (см., например, Reines et al., 2013), ведущимися в попытке обнаружить черные дыры промежуточных масс (intermediate mass black holes, IMBH).

До недавнего времени проблема самого существования IMBH — предполагаемых черных дыр с массами меньше сверхмассивных черных дыр в центрах галактик, но больше черных дыр звездных масс, являющихся остатками эволюции массивных звезд — была сугубо теоретической (Madau & Rees, 2001; Madau et al., 2004; Miller & Colbert, 2004; Volonteri & Perna, 2005) без непосредственной наблюдательной перспективы. Первый надежный кандидат в IMBH был обнаружен случайно в 2009 году (Farrell et al., 2009), чем резко увеличил интерес научного сообщества к этим объектам, которые внезапно перестали быть гипотетическими. Поиск IMBH в настоящее время ведется десятками научных групп во всем мире, и его методы можно в основном разделить на 2 группы: 1) исследование массивного хвоста распределения черных дыр звездных масс, содержащихся в ультраярких рентгеновских источниках (ultraluminous X-ray sources, ULX) (Walton et al., 2011); 2) исследование маломассивного хвоста распределения сверхмассивных черных дыр в центрах галактик, поиск маломассивных активных ядер галактик (active galactic nuclei, AGN) с использованием соотношений для сверхмассивных черных дыр (Kormendy & Ho, 2013).

Первая группа методов представлена наиболее широко, исследования в основном сосредоточены в рентгеновском диапазоне в попытках найти в периферических областях галактик наиболее яркие ULX со светимостью $L_X > 10^{41}$ эрг s^{-1} , которая бы означала присутствие в объекте черной дыры с массой более 100 масс Солнца (т.н. гипер-яркие рентгеновские источники, HLX). Несмотря на все усилия (см., например, лишь некоторые недавние работы: Heida et al. (2015); Kim et al. (2015); Wrobel et al. (2015); Lin et al. (2016)), объект HLX-1 со светимостью до $L_X = 10^{42}$ эрг s^{-1} , расположенный на расстоянии $8''$ от центра S0 галактики ESO 243-49, видимой с ребра (Farrell et al., 2009), по-прежнему остается единственным надежным HLX и кандидатом в IMBH (Webb et al., 2012).

Вторая группа методов, опирающаяся на исследования AGN, хотя и возникла раньше исторически, представлена в меньшем объеме (Greene & Ho, 2004, 2007; Graham, 2012). Основными трудностями этого подхода являются существенная неопределенность оценки

массы черной дыры из масштабирующих соотношений для SMBH и сложность массового применения более точных методов (например, оценки массы через моделирование профиля линии $H\alpha$, см. [Greene & Ho \(2005\)](#)).

Нам представляется перспективным выполнение первого систематического поиска объектов, похожих на HLX-1, по первому сценарию, который и представлен в настоящей диссертации.

Рентгеновские двойные звезды (X-ray binaries, XRB) представляют собой класс двойных звезд со значительным излучением в рентгеновском диапазоне. Рентгеновское излучение производится веществом, которое падает от донора (обычно сравнительно нормальной невырожденной звезды) на компактный компонент системы — белый карлик, нейтронную звезду или черную дыру. Падающее вещество преобразует свою потенциальную гравитационную энергию, в количестве десятков процентов от собственной массы покоя, в рентгеновское излучение.

Исследования переменности рентгеновских объектов переживают в настоящее время небывалый ажиотаж, поскольку совсем недавно они стали причиной пересмотра фундаментального физического ограничения — предела Эддингтона на светимость компактных объектов. После случайного открытия пульсаций в ультраярком рентгеновском источнике M82 X-2 ([Bachetti et al., 2014](#)) со светимостью, достигающей $L_X = 10^{40}$ эрг s^{-1} стало понятно, что нейтронные звезды могут иметь существенным образом сверхэддингтоновскую светимость. К настоящему моменту пульсации найдены уже в нескольких ULX ([Fürst et al., 2016](#); [Israel et al., 2016](#)). Помимо этого огромный интерес представляет недавнее обнаружение коротких (длительностью порядка минуты) сверхэддингтоновских вспышек рентгеновских двойных систем в галактике NGC 4697 ([Irwin et al., 2016](#)). Даже частные попытки поиска пульсаций приносят интересные результаты (см., например, [Haberl et al., 2016](#)), поскольку еще не предпринято масштабных детальных исследований переменности всех известных рентгеновских объектов в существующих данных из-за инфраструктурных и алгоритмических сложностей. Систематический поиск когерентных пульсаций и других видов переменности у большого количества рентгеновских источников разных типов, таким образом, представляется крайне актуальной задачей. Целью этого масштабного усилия в конечном счете станет классификация переменности всех известных рентгеновских объектов на масштабах от субсекунд до лет на основании уже существующих в Виртуальной Обсерватории данных.

Рентгеновские обзоры неба, выполненные в последние полтора десятилетия, принесли с собой множество информации о различных популяциях источников в нашей Галактике (см., например, [Grimm et al., 2002](#); [Gilfanov, 2004](#); [Sazonov et al., 2006](#)). Попытки сформировать полные выборки объектов мотивированы желанием иметь хорошую статистику, достаточную для проверки предсказаний теории эволюции двойных систем, которая в свою очередь сможет помочь в исследовании физических эффектов, которые невозможно изучать никакими другими способами.

Наша Галактика достаточно хорошо изучена в рентгеновском диапазоне (см., например, рентгеновский обзор спутника *Uhuru* в работе [Forman et al., 1978](#)), значительная доля ярких источников надежно отождествлена, а их свойства занесены в каталоги (см., например, [Liu et al., 2007](#)). Исследования различных выборок известных источников позволяют связать их наблюдаемые свойства с характеристиками популяции. Например, было показано, что маломассивные рентгеновские двойные (low-mass X-ray binaries, LMXB) кор-

релируют с плотностью звезд (Grimm et al., 2002; Gilfanov, 2004), тогда как массивные рентгеновские двойные в других галактиках — с полным темпом звездообразования в них (Grimm et al., 2003; Ranalli et al., 2003); пространственное распределение массивных рентгеновских двойных и его связь с областями звездообразования позволяют ограничить скорости, которые они получают при рождении (Bodaghee et al., 2012; Coleiro & Chaty, 2013); распределение LMXB по светимости имеет характерные особенности: 1) соответствующую эддингтоновской светимости для нейтронных звезд (Gilfanov, 2004), 2) соответствующую смене типа звезды-донора (Revnitsev et al., 2011), и другие.

В более свежих обзорах Галактики была обнаружена популяция слабых Галактических рентгеновских источников, которые пока еще не были отождествлены в оптическом диапазоне. Типичная чувствительность последних обзоров, покрывающих значительную часть диска Галактики, составляет $\simeq 5 \times 10^{-12}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ в диапазоне энергий 17–60 кэВ (см., например, Krivonos et al., 2012), что соответствует светимостям $L_X \simeq 10^{33}$ – 10^{35} эрг с^{-1} на расстояниях 2–10 кпк.

Этот диапазон светимостей имеет некоторые специфические особенности. Рентгеновские двойные с такими светимостями, когда перенос массы должен происходить из-за переполнения звездой-компаньоном своей полости Роша, не могут иметь стабильные аккреционные диски вследствие тепловой неустойчивости (см., например, Meyer & Meyer-Hofmeister, 1981; Dubus et al., 1999; Lasota, 2001) и следовательно должны быть транзитными, если только они не являются крайне компактными системами с орбитальным периодом менее \simeq часа. Компактные системы имеют более горячие аккреционные диски, температура которых находится выше предельного для тепловой неустойчивости значения (Dubus et al., 2001). С другой стороны, рентгеновские источники могут иметь такие низкие светимости, если они аккрецируют не из-за переполнения звездой-донором своей полости Роша, а путем захвата ее звездного ветра. Объекты такого типа исторически называются симбиотическими звездами и очень редки (Masetti et al., 2007). Другая особенность этого диапазона светимости заключается в том, что при аккреции вещества на старые нейтронные звезды с магнитным полем на поверхности в 10^8 Гс и типичным темпом аккреции ожидается так называемый эффект “пропеллера” (Illarionov & Sunyaev, 1975; Campana et al., 1995), при котором светимость источника падает ниже уровня, на котором мы можем его обнаружить. Поэтому систематический поиск и отождествление кандидатов в LMXB низкой светимости представляет значительный интерес для понимания физики аккреции в них.

После обнаружения гравитационных волн от сливающихся черных дыр на космологическом расстоянии (Abbott et al., 2016) к LMXB также привлечено большое внимание как к источникам гравитационных волн в нашей Галактике. Действительно, LMXB с небольшими аккреционными дисками должны быть достаточно тесными, чтобы излучать гравитационные волны достаточной для обнаружения в ближайшие годы экспериментами Advanced LIGO и Advanced VIRGO мощности. Более того, ожидается, что эволюция компактных LMXB определяется гравитационным излучением (см., например, Paczyński, 1967; Tutukov & Yungelson, 1979; Paczynski & Sienkiewicz, 1981; Postnov & Kuranov, 2005), которое напрямую влияет на их наблюдаемые характеристики, в частности орбитальные периоды. Однако всего лишь 40% из около 200 LMXB известных в Галактике имеют оценки орбитальных периодов (Liu et al., 2007). Помимо этого известно, что эволюция орбитального периода LMXB весьма мала и обнаружить ее напрямую затруднительно (Burderi

et al., 2009). Несмотря на это, вполне естественно предположить, что влияние потери орбитальной энергии посредством излучения гравитационных волн должно проявляться в статистических свойствах распределения LMXB по периодам (см., например, Rappaport et al., 1983; Kolb, 1993; Howell et al., 2001)). Поэтому массовое определение периодов LMXB может помочь 1) в изучении процессов трансформации энергии на эволюционных масштабах времени в LMXB, 2) в обнаружении редких (например, ультракомпактных или симбиотических LMXB, аккрецирующих звездный ветер донора) систем, которые помогут ограничить теории эволюции тесных двойных систем и которые должны стать яркими источниками гравитационного излучения на небе, (3) подтвердить или опровергнуть гипотезу существования “пробела” в орбитальных периодах LMXB между 1 и 2 часами, точно так же, как он имеет место в катаклизмических переменных между 2 и 3 часами. Поскольку не существует однозначного списка LMXB в Галактике, среди рентгеновских источников известно множество неверно классифицированных LMXB и неотожествленных объектов. Они, несомненно, создают дополнительные трудности для поиска и исследования компактных LMXB и требуют тщательной проверки прежде чем считаться кандидатами в компактные LMXB.

Чтобы ответить на эти проблемы, требуется разработка модели излучения аккреционного диска в оптическом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах, которая связала бы их глобальные свойства (такие, как орбитальный период) с наблюдаемыми величинами. Ожидается, что светимость LMXB в ближнем ИК диапазоне служит эффективным индикатором орбитального периода двойной системы: чем больше расстояние между компонентами, тем больше размер аккреционного диска и тем больше переработанных ИК фотонов он излучает. Таким образом, должен существовать наблюдательно эффективный способ (без необходимости спектральных наблюдений) построить распределение орбитальных периодов LMXB, используя данные больших обзоров неба в ближнем ИК диапазоне – UKIDSS Galactic Plane Survey (Lawrence et al., 2007) и VISTA Variables in Via Lactea survey (Minniti et al., 2010). Использование ИК диапазона в данном случае также неслучайно, поскольку многие малоизученные рентгеновские источники, открытые в последние годы в результате обзоров Галактики в жестком рентгеновском диапазоне, располагаются в областях Млечного Пути с чрезвычайно высоким уровнем поглощения в 20–40 зв. вел. в оптическом диапазоне, делающем их недоступными для изучения в нем.

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена изучению редких астрофизических объектов в больших массивах публично доступных данных и представляет собой, таким образом, пример *data science* — отталкивающегося от данных исследования. Вслед за случайными открытиями единичных объектов — гипер-яркого рентгеновского источника ESO 243–49 HLX–1, изолированной компактной эллиптической галактики, нейтронной звезды в системе M82 X–2 со сверхэддингтоновской светимостью — в диссертации предпринимается попытка систематического поиска и обобщения информации об их популяциях во всех имеющейся в Виртуальной Обсерватории данных. Одним из отличительных свойств работы является создание двух больших каталогов, как использующихся в исследованиях в самой диссертации, так и без сомнения чрезвычайно востребованных в будущем — каталога свойств 1 млн. галактик и крупнейшего каталога рентгеновских источников.

Актуальность темы

Общая концепция настоящей работы, связанная с исследованиями в больших массивах астрономических данных, представляется чрезвычайно своевременной в свете взрывных темпов роста их объема. Тематически диссертация также включает в себя одни из наиболее популярных задач в современной астрофизике.

Стандартные теории формирования и эволюции галактик — например, теория их иерархического слияния, начиная от первичных мини-гало темной материи до крупнейших наблюдаемых в нашу эпоху систем — не описывают всего сложного комплекса наблюдаемых свойств галактик. Многие существующие взгляды в данной дисциплине астрофизики требуют ревизии и уточнения. Например, для некоторых видов карликовых галактик, а именно для компактных и ультракомпактных галактик, слабо изучена роль процессов приливного “обдирания”, приводящего к образованию этих компактных звездных систем. Основным препятствием здесь по-прежнему является малое число объектов данных типов. Только сейчас, в эпоху массовых спектральных и фотометрических обзоров галактик, появляются средства для всестороннего анализа приливного взаимодействия галактик, играющего важнейшую роль в их происхождении и эволюции. Поиск новых компактных и ультракомпактных галактик и исследование их динамики и характеристик звездного населения являются, таким образом, актуальной проблемой для понимания влияния окружения на эволюцию галактик вообще и карликовых галактик в частности. Диссертация открывает возможность для прогресса в этом направлении в связи с составлением каталога широкого набора свойств для почти 1 млн. галактик. Всестороннее изучение наблюдаемых УФ, оптических и ИК цветов галактик и обнаружение новых фотометрических зависимостей для их разных типов при этом начинает играть ключевую роль в связи с массовым характером проводимых исследований.

Другим следствием стандартной космологической теории иерархического образования галактик является существование черных дыр промежуточных масс (IMBH) — “строительных блоков” для повсеместно наблюдаемых сверхмассивных черных дыр в центрах галактик. Хотя необходимость существования IMBH следует из факта наличия сверхмассивных черных дыр в квазарах в ранней Вселенной, по-прежнему неясно, существуют ли такие черные дыры в современную эпоху. Наилучший известный кандидат в IMBH — единственный гипер-яркий источник ESO 243–49 HLX–1 — был обнаружен случайно. Широкомасштабный поиск гипер-ярких рентгеновских источников в других галактиках является поэтому задачей чрезвычайной важности с множеством последствий для космологических теорий. Первым шагом на этом пути, естественно, является создание больших однородных каталогов рентгеновских источников. Помимо обозначенной цели они также пригодны и применяются в диссертации для изучения переменности внегалактических рентгеновских объектов — направления астрофизики, переживающего сейчас настоящую революцию после открытия нейтронных звезд со значительной сверхэддингтоновской светимостью.

Наконец, исследование и интерпретация инфракрасных цветов маломассивных рентгеновских двойных является одним из важнейших направлений наблюдательного прогресса в изучении физики тесных двойных систем, обнаруженных в жестком рентгеновском диапазоне в поглощенных областях Галактики, недоступных для оптических наблюдений. Эти задачи особенно актуальны в свете недавних и выполняющихся в настоящее время глубо-

ких фотометрических обзоров Галактики в ближнем инфракрасном диапазоне. Диссертация восполняет некоторые важные пробелы в этом направлении и открывает перспективу для массового определения периодов LMXB, которые, среди прочего, представляют интерес с точки зрения бурно развивающейся гравитационно-волновой астрономии.

Помимо остального важно отметить, что сделанные в настоящей диссертации наработки по классификации, каталогизации и исследованию переменности рентгеновских источников естественным образом применимы к данным российско-немецкого космического эксперимента *Спектр-РГ*, запуск которого намечен на конец 2017 года.

Цель работы

Создание больших каталогов астрофизических объектов, пригодных для решения широкого круга научных задач: 1) эталонного справочного каталога свойств галактик; 2) каталога рентгеновских источников. Организация эффективных методов доступа к широкому набору данных, связанных с каждым объектом из каталогов. Разработка масштабируемой инфраструктуры, пригодной для повторного использования для компиляции и распространения данных различных астрономических каталогов.

Исследование фотометрических свойств и соотношений для нормальных галактик. Поиск популяции компактных эллиптических галактик (сЕ), свободный от эффектов наблюдательной селекции, связанных с окружением. Исследование свойств изолированных сЕ галактик, сравнение их с галактиками в группах и скоплениях.

Исследование популяции рентгеновских источников в Галактике. Разработка эффективных методов классификации источников по типам и отождествления их двойников в разных диапазонах спектра на основании имеющейся в Виртуальной Обсерватории информации. Построение актуального соотношения для оценки орбитального периода по ИК светимости маломассивных рентгеновских двойных систем (LMXB) с нейтронными звездами. Поиск ультракомпактных и симбиотических LMXB.

Поиск рентгеновских пульсаров в Галактике и за ее пределами. Создание первой выборки гипер-ярких рентгеновских источников (HLX), оценка ее чистоты и частоты встречаемости HLX.

Научная новизна работы

1. Создан ряд больших эталонных каталогов астрофизических объектов, не имеющих аналогов и пригодных для решения самого широкого круга астрофизических задач: 1) каталог RCSED распределений энергии в спектре, свойств звездных населений и газа галактик; 2) крупнейший каталог рентгеновских источников 3XMM;
2. Предложена зависимость период–светимость в ближнем ИК диапазоне для постоянных маломассивных рентгеновских двойных систем с нейтронными звездами;
3. Впервые найдены оптические и/или инфракрасные двойники или ограничения на них для следующих рентгеновских двойных систем: SLX 1735–269, 3A 1742–294, SLX 1744–299, SLX 1744–300, GX 3+1, IGR J17505–2644, SAX J1747.0–2853, IGR J17464–2811, AX J1754.2–2754, IGR J17597–2201, IGR J18134–1636, IGR J18256–1035, Ser X–1 и AX J194939+2631; получен консервативный верхний

предел на орбитальный период AX J1754.2–2754 в 2 ч; высказано предположение об объяснении природы IGR J17597–2201 симбиотической LMXB;

4. Открыто универсальное соотношение между цветами в ближнем УФ и оптическом диапазонах и светимостью нормальных галактик, ставшее самым точным из известных фотометрических соотношений; показано, что некоторые редкие типы галактик отклоняются от этого соотношения, что возможно эффективно использовать для их поиска, свободного от многих ранее существовавших эффектов наблюдательной селекции;
5. Открыто 195 компактных эллиптических галактик, что семикратно увеличило известную популяцию этих объектов и перевело их из категории редких в обычные; среди открытых сЕ галактик обнаружено 11 изолированных объектов и объяснено их происхождение; продемонстрированы все стадии вылета компактных эллиптических галактик из скоплений галактик в результате взаимодействия трех тел;
6. Доказаны существование и наблюдаемость популяции гипер-ярких рентгеновских источников со светимостями свыше $L_X > 10^{41}$ эрг s^{-1} , являющихся одними из наилучших кандидатов в аккрецирующие черные дыры промежуточных масс; предложен список HLX-кандидатов для спектральных наблюдений;
7. В плотном шаровом скоплении в галактике Андромеды с возрастом 12 млрд. лет обнаружен редкий нераскрученный рентгеновский пульсар с периодом вращения нейтронной звезды 1.2 с и орбитальным периодом 30.5 ч, аккрецирующий на уровне до 30% от эддингтоновского темпа аккреции; из векового тренда его раскрутки получены оценки магнитного поля нейтронной звезды; подтверждены выводы о роли глобальной и удельной частот звездных сближений для формирования редких LMXB в шаровых скоплениях; тем самым стандартная теория раскрутки пульсаров аккрецией до миллисекундных периодов дополнена важным недостающим наблюдательным примером.

Совокупность включенных в диссертацию результатов представляет зарождающееся направление астрофизических исследований, отталкивающихся от больших массивов данных (*data science*).

Практическая ценность

1. Предложен наблюдательно эффективный метод определения орбитального периода постоянно аккрецирующих маломассивных рентгеновских двойных систем на основе фотометрических наблюдений в ближнем инфракрасном диапазоне. Метод открывает возможность массового исследования рентгеновских объектов в областях Галактики с высоким поглощением на луче зрения, получения распределения орбитальных периодов таких систем, поиска ультракомпактных двойных систем и двойных систем с джетами.
2. Предложен высокоселективный метод отождествления рентгеновских объектов в плоскости Галактики с большими неопределенностями положения путем использования многоволновых каталогов, доступных в Виртуальной Обсерватории.

3. Сформулирован метод поиска гипер-ярких рентгеновских источников путем сопоставления больших спектральных каталогов галактик и каталогов рентгеновских источников, дающий большое число качественных кандидатов.
4. Созданы крупнейшие каталоги рентгеновских источников 3XMM-DR5 и 3XMM-DR6, пригодные для самого широкого круга задач в рентгеновской астрономии. Разработано веб-приложение для быстрого научного анализа данных каталога, в т.ч. для работы с данными на уровне рентгеновских фотонов.
5. Создан эталонный каталог 800 299 галактик, включающий в себя: оптические спектры, распределения энергии в 11 полосах в ультрафиолетовом, оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах, морфологическую информацию, свойства звездного населения и ионизованного газа. Каталог галактик имеет важные перспективы применения в разнообразных внегалактических исследованиях. Для доступа к продуктам каталога разработано веб-приложение, облегчающее его практическое использование.
6. Разработана масштабируемая архитектура для компиляции и распространения в сети Интернет различных каталогов астрофизических объектов и широкого набора связанных с ними продуктов данных. Архитектура пригодна для повторного использования в будущих каталогах с высокой научной ценностью — например, в каталогах эксперимента *Спектр-РГ*.

Апробация результатов работы

Результаты работы докладывались автором на 15 научных семинарах в 11 российских и зарубежных институтах и на 19 международных научных конференциях в период с 2009 по 2016 годы, в том числе:

- JENAM 2010 (Лиссабон, Португалия, 6–10 сентября 2010)
- EWASS 2011 (Санкт-Петербург, Россия, 4–8 июля 2011)
- Научный семинар Парижской обсерватории (Париж, Франция, 22 ноября 2012)
- ADASS XXIII (Ваиколоа, шт. Гавайи, США, 29 сентября – 3 октября 2013)
- The X-ray Universe 2014 (Дублин, Ирландия, 16–20 июня 2014)
- Научный семинар Обсерватории Кальяри (Кальяри, Италия, 28 ноября 2014)
- Астрофизика Высоких Энергий (ИКИ, Москва, Россия, 22–25 декабря 2014)
- Научный семинар Института астрофизики и планетологии (Тулуза, Франция, 10 апреля 2015)
- ESO-ESA Workshop “Science Operations 2015: Science Data Management” (Гархинг, Германия, 24–27 ноября 2015)
- Научный семинар Центра астрономии Европейского космического агентства (Мадрид, Испания, 28 января 2016)
- Научный семинар Страсбургской обсерватории (Страсбург, Франция, 5 февраля 2016)

- Семинар отдела релятивистской астрофизики (ГАИШ МГУ, Москва, Россия, 29 марта 2016)
- Семинар отдела астрофизики высоких энергий Гарвард–Смитсоновского центра астрофизики (Гарвард, шт. Массачусетс, США, 6 апреля 2016)
- ULX and their environments (Страсбург, Франция, 13–16 июня 2016)
- Координационный совет по Астрофизике (ГАИШ МГУ, Москва, Россия, 26 октября 2016)

Публикации и личный вклад автора

Основные результаты диссертации изложены в 26 работах, опубликованных в зарубежных изданиях, а также в трудах международных конференций. В работах [12, 14, 20, 22, 23] автор является создателем базы данных, веб-приложения, ключевой инфраструктуры каталога экзопланет и каталога рассеянных скоплений, совместимой с Виртуальной Обсерваторией. В работах [1, 9, 10, 13] автору принадлежит вклад в постановку задачи, создание программных пакетов для обработки данных и компиляции каталогов, статистический анализ выборок астрофизических объектов и интерпретация его результатов. В работе [4] автору принадлежит существенный вклад в разработку идеи и построение модели облученного аккреционного диска. В работе [16] автору принадлежит создание алгоритмов и компиляция каталога из сырых продуктов данных, создание базы данных рентгеновских источников, веб-приложения для их визуализации, создание всех основных готовых к анализу продуктов каталога *XMM-Newton*, распространяемых в научном сообществе. В работах из списка публикаций, где фамилия автора указана первой, автору принадлежит постановка задачи, обработка данных, интерпретация полученных результатов и доведение их до публикации. В оставшихся работах при небольших коллективах автору принадлежит значительный вклад в постановку задачи и дальнейшую ее разработку.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и содержит: 240 страниц, 72 рисунка, 22 таблицы. Список литературы насчитывает 487 наименований. В начале каждого раздела приводятся ссылки на работы, опубликованные по данной теме автором.

В **первой главе** дано методическое введение в диссертацию. Описываются основные методы работы с данными, детали создания каталога галактик RCSED и крупнейшего каталога рентгеновских источников 3XMM, используемые в последующих главах диссертации.

Вторая глава посвящена исследованиям различных популяций рентгеновских источников в нашей Галактике, в основном маломассивных рентгеновских двойных систем. Приводятся результаты отождествления в оптическом и ближнем ИК диапазонах 13 рентгеновских источников, способы получения ограничений на их физическую природу. Описывается модель облученного аккреционного диска, открывающая возможность наблюдательно эффективного способа определения орбитального периода LMXB. В качестве

методического аспекта в данной главе обсуждается классификация неисследованных рентгеновских источников на основании информации, доступной в больших обзорах и Виртуальной Обсерватории.

В **третьей главе** представлены результаты исследования нормальных галактик в близкой Вселенной. Созданный в рамках настоящей работы каталог галактик RCSED позволил обнаружить универсальное соотношение цвет–цвет–величина в ближнем УФ и оптическом диапазоне. Некоторые редкие типы галактик, такие, как компактные эллиптические галактики, выпадают из этой зависимости, открывая тем самым новую возможность для их поиска, свободного от многих эффектов наблюдательной селекции. Во второй части главы описывается широкомасштабный поиск сЕ галактик, приведший к открытию популяции изолированных сЕ, когда-то участвовавших в приливном обдирании в плотных центрах скоплений и затем выброшенных оттуда в результате эффекта пращи при сближении 3 галактик.

В **четвертой главе** приводятся результаты поиска редких рентгеновских объектов с использованием методических результатов предыдущих глав, а именно каталога рентгеновских источников 3ХММ и методов классификации и отождествления наиболее распространенных типов рентгеновских объектов. Описан поиск гипер-ярких рентгеновских источников со светимостями свыше 10^{41} эрг с^{-1} , приведший к важному ограничению снизу на существование популяции HLX. Описывается открытие первого пульсара XB091D в галактике Андромеды, ставшего также самым медленным из известных в шаровых скоплениях пульсаров. XB091D находится в самом начале процесса раскрутки нейтронной звезды до частот в сотни Гц и является важным недостающим звеном в стандартной теории эволюции нейтронных звезд в двойных системах.

В **заключении** приводятся выводы, выносимые на защиту.

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

1. I. Chilingarian, I. Zolotukhin / *Isolated compact elliptical galaxies: Stellar systems that ran away* // **Science** — 2015. — April. — Vol. 348. — Pp. 418–421
2. I. Zolotukhin, M. Revnivtsev / *Sample of LMXBs in the Galactic bulge - I. Optical and near-infrared constraints from the Virtual Observatory* // **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society** — 2011. — February. — Vol. 411. — Pp. 620–626
3. I. Zolotukhin, M. Revnivtsev / *Sample of optically unidentified X-ray binaries in the Galactic bulge: constraints on the physical nature from infrared photometric surveys* // **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society** — 2015. — January. — Vol. 446. — Pp. 2418–2427
4. M. Revnivtsev, I. Zolotukhin, A. Meshcheryakov / *Period-luminosity relation for persistent low-mass X-ray binaries in the near-infrared* // **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society** — 2012. — April. — Vol. 421. — Pp. 2846–2853
5. I. Zolotukhin, M. Revnivtsev, N. Shakura / *Infrared identification of 4U1323-619 revisited* // **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society** — 2010. — January. — Vol. 401. — Pp. 1–4

6. I. Zolotukhin, I. Chilingarian / *Virtual Observatory based identification of AX J194939+2631 as a new cataclysmic variable* // **Astronomy & Astrophysics** — 2011. — February. — Vol. 526. — Pp. 84–88
7. I. Zolotukhin, N. Webb, O. Godet, M. Bachetti, D. Barret / *A Search for Hyperluminous X-Ray Sources in the XMM-Newton Source Catalog* // **The Astrophysical Journal** — 2016. — February. — Vol. 817. — Pp. 88–100
8. I. Zolotukhin, M. Bachetti, N. Sartore, I. Chilingarian, N. Webb / *The slowest spinning X-ray pulsar in an extragalactic globular cluster* // **The Astrophysical Journal**, **in press** — 2016. — February. — arXiv:1602.05191
9. I. Chilingarian, I. Zolotukhin / *A universal ultraviolet-optical colour-colour-magnitude relation of galaxies* // **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society** — 2012. — January. — Vol. 419. — Pp. 1727–1739
10. I. Chilingarian, I. Zolotukhin, I. Katkov, A.-L. Melchior, E. Rubtsov, K. Grishin / *RCSED – A Value-Added Reference Catalog of Spectral Energy Distributions of 800,299 Galaxies in 11 Ultraviolet, Optical, and Near-Infrared Bands: Morphologies, Colors, Ionized Gas and Stellar Populations Properties* // **The Astrophysical Journal Supplement**, **in press** — 2016. — December. — arXiv:1612.02047
11. S. Kopusov, E. Glushkova, I. Zolotukhin / *Automated search for Galactic star clusters in large multiband surveys. I. Discovery of 15 new open clusters in the Galactic anticenter region* // **Astronomy & Astrophysics** — 2008. — August. — Vol. 486. — Pp. 771–777
12. E. Glushkova, S. Kopusov, I. Zolotukhin et al. / *Automated search for star clusters in large multiband surveys: II. Discovery and investigation of open clusters in the galactic plane* // **Astronomy Letters** — 2010. — February. — Vol. 36. — Pp. 75–85
13. I. Chilingarian, A.-L. Melchior, I. Zolotukhin, *Analytical approximations of K-corrections in optical and near-infrared bands* // **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society** — 2010. — July. — Vol. 405. — Pp. 1409–1420
14. J. Schneider, C. Dedieu, P. Le Sidaner, R. Savalle, I. Zolotukhin / *Defining and cataloging exoplanets: the exoplanet.eu database* // **Astronomy & Astrophysics** — 2011. — August. — Vol. 532. — Pp. 79–90
15. O. Malkov, I. Zolotukhin / *Virtual Observatory for stellar astronomy* // **Astronomische Nachrichten** — 2013. — October. — Vol. 334. — Pp. 818–+
16. S. Rosen et al. / *The XMM-Newton serendipitous survey. VII. The third XMM-Newton serendipitous source catalogue* // **Astronomy & Astrophysics** — 2016. — May. — Vol. 590. — Pp. 1–22
17. O. Malkov, O. Dluzhnevskaya, O. Bartunov, I. Zolotukhin / *International Virtual Observatory: 10 years later* // *Methods and Instruments in Astronomy: From Galileo Telescopes to Space Projects. Proceedings of a conference held 17-20 May, 2010 at the Nikolaev Astronomical Observatory, Mykolaiv, Ukraine. Online at: <http://nao.nikolaev.ua/nao2010/programme.html>, id.23* — 2010. — May.

18. I. Chilingarian, I. Zolotukhin / *Transparent Scientific Usage as the Key to Success of the Virtual Observatory* // *Astronomical Data Analysis Software and Systems XIX* / Ed. by Yoshihiko Mizumoto, Koh-Ichiro Morita, and Masatoshi Ohishi. — Vol. 434 of **Astronomical Society of the Pacific Conference Series**. — 2010. — December. — P. 179.
19. I. Chilingarian, I. Zolotukhin / *The True Bottleneck of Modern Scientific Computing in Astronomy* // *Astronomical Data Analysis Software and Systems XX* / Ed. by Ian N. Evans, Alberto Accomazzi, Douglas J. Mink, and Arnold H. Rots. — Vol. 442 of **Astronomical Society of the Pacific Conference Series**. — 2011. — July. — P. 471.
20. E. Glushkova, S. Kopusov, I. Zolotukhin, R. Yadav / *Properties of Star Clusters Found and Investigated by Data from Large Surveys* // *Star Clusters in the Era of Large Surveys* / Ed. by A. Motinho and J. Alves. — Vol. 29 of **Astrophysics and Space Science Proceedings**. — 2012. — January. — P. 47.
21. I. Zolotukhin, E. Glushkova / *Open Clusters Science in the Virtual Observatory Era* // *Star Clusters in the Era of Large Surveys* / Ed. by A. Motinho and J. Alves. — Vol. 29 of **Astrophysics and Space Science Proceedings**. — 2012. — January. — P. 87.
22. F. Le Petit et al. / *VO-Paris Data Centre (VO-PDC)* // *Astronomical Data Analysis Software and Systems XXI* / Ed. by P. Ballester, D. Egret, and N.P.F. Lorente. — Vol. 461 of **Astronomical Society of the Pacific Conference Series**. — 2012. — September. — P. 399.
23. J. Schneider, P. Le Sidaner, R. Savalle, I. Zolotukhin / *The exoplanet.eu Database and Associated VO Services* // *Astronomical Data Analysis Software and Systems XXI* / Ed. by P. Ballester, D. Egret, and N.P.F. Lorente. — Vol. 461 of **Astronomical Society of the Pacific Conference Series**. — 2012. — September. — P. 447.
24. I. Zolotukhin, N. Webb, O. Godet, M. Bachetti, D. Barret / *A search for hyperluminous X-ray sources in the XMM-Newton source catalog* // *The X-ray Universe 2014*, edited by Jan-Uwe Ness. Online at <http://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton/2014-symposium/>, id.215 — 2014. — July.
25. F. Paletou, I. Zolotukhin / *Using Virtual Observatory with Python: querying remote astronomical databases* // arXiv:1408.7026 — 2014. — August.
26. I. Zolotukhin / *Efficient management of high level XMM-Newton science data products* // *Science Operations 2015: Science Data Management – An ESO/ESA Workshop*, held 24-27 November, 2015 at ESO Garching. Online at <https://www.eso.org/sci/meetings/2015/SciOps2015.html>, id.1 — 2015. — December.

Глава 1

Каталоги и базы данных астрофизических объектов

Диссертацию открывает глава с описанием методических наработок, на которых основаны научные результаты остальных глав. Общая парадигма исследований в настоящей работе связана с созданием крупных каталогов астрофизических объектов — в данном случае галактик и рентгеновских источников — и последующей работой с ними с целью изучения конкретных объектов или свойств их популяций в новых однородных данных. Отметим, что отдельные аспекты предлагаемой методологии первоначально были апробированы в кандидатской диссертации автора на примере создания базы данных Каталога рассеянных скоплений ГАИШ МГУ¹ (Koposov et al., 2008; Glushkova et al., 2010), а затем в крупнейшей Энциклопедии экзопланет² (Schneider et al., 2011).

Результаты научных исследований с помощью каталогов из Главы 1 настоящей диссертации приводятся ниже в Главах 2, 3 и 4. В первой части настоящей главы, таким образом, описывается создание каталога нормальных галактик, а во второй, кратко — крупнейшего каталога рентгеновских источников. В данном введении обсуждается мотивация нашей работы над каталогами.

За последнее десятилетие мы стали свидетелями прорыва в широкопольных фотометрических обзорах в различных диапазонах электромагнитного спектра. Новая эра началась со Слоановского цифрового обзора неба (Sloan Digital Sky Survey, SDSS), использовавшего 2.5-м телескоп и покрывшего более 11 600 кв. град. неба в 5 оптических фотометрических полосах (*ugriz*) вплоть до 22 звездной величины в системе AB в своем 7 релизе данных (Abazajian et al., 2009). Спектроскопическое дополнение обзора охватило более миллиона галактик и квазаров и полмиллиона звезд до предельной звездной величины $r = 17.77$ в системе AB. Несмотря на то, что к 2016 году данные SDSS и его продолжений (SDSS-II и SDSS-III) были использованы почти в 20 000 исследовательских работ³, потенциал SDSS для научных исследований далек от истощения.

В конце 2000-х годов глубокие широкопольные обзоры вышли за пределы оптического диапазона спектра. Спутник *Galaxy Evolution Explorer* (*GALEX*) (Martin et al., 2005) охватил почти все небо фотометрией в двух ультрафиолетовых (УФ) полосах, центрированных на 158 и 228 нм, до предельной звездной величины $AB = 20.5$ зв. вел. Область

¹<http://ocl.sai.msu.ru>

²<http://exoplanet.eu>

³Согласно NASA ADS, <http://ads.harvard.edu/>

охвата SDSS наблюдалась *GALEX* с 15-кратным увеличением времени экспозиции, что позволило достигнуть более глубокого предела по величине $AB = 23.5$ зв. вел. Относительно маленький телескоп обеспечил пространственное разрешение в несколько угловых секунд, соответствующее типичному качеству изображений с наземных инструментов.

В то же время другой международной командой была проделана большая работа на 4-метровом инфракрасном телескопе Соединенного Королевства (United Kingdom Infrared Telescope, UKIRT) для обзора существенной части неба, в значительной мере перекрывающейся с SDSS, в 4 ближних инфракрасных (near-infrared, NIR) полосах (*YJHK*). Обзор большой области неба (Large Area Survey, LAS) в рамках глубокого обзора неба на телескопе UKIRT (UKIRT Deep Sky Survey, UKIDSS) (Lawrence et al., 2007) обеспечивает субсекундное разрешение и предел по потокам, соответствующий SDSS в оптическом диапазоне. Он достигает $AB \sim 21.2$ зв. вел., что на 3–4 зв. вел. глубже, чем в первом полном обзоре неба в ближнем инфракрасном диапазоне 2MASS (Skrutskie et al., 2006).

В многочисленных работах изучалась полная выборка галактик из SDSS путем анализа абсорбционных (см., например, Kauffmann et al., 2003; Gallazzi et al., 2006) и эмиссионных (Brinchmann et al., 2004; Tremonti et al., 2004; Oh et al., 2011, 2015) линий спектров SDSS. Однако, они не использовали никакой дополнительной информации по объектам сверх той, что доступна в базе данных SDSS.

Первая успешная попытка дополнить данные SDSS была сделана десять лет назад в дополненном каталоге галактик Нью-Йоркского университета (New York University Value-Added Galaxy Catalog, NYU-VAGC) (Blanton et al., 2005). Он был нацелен на исследования статистических свойств галактик и крупномасштабной структуры Вселенной и включал в себя данные по фотометрии и спектроскопии одной из ранних версий SDSS (что составляет около 20% от последней версии). Он также содержал позиционные отождествления с 2MASS, каталогом точечных источников в дальнем инфракрасном диапазоне *IRAS* (Saunders et al., 2000), обзором слабых радиоисточников на длине волны 20 см *FIRST* (Becker et al., 1995) и дополнительную информацию по галактикам из 3-го справочного каталога ярких галактик (3rd Reference Catalogue of Bright Galaxies, de Vaucouleurs et al., 1991) и обзора красных смещений галактик в поле 2 градуса (Two-Degree Field Galaxy Redshift Survey, Colless et al., 2001). Теперь, спустя десятилетие после публикации NYU-VAGC, существует острая необходимость в следующем поколении каталога галактик, основанного на данных современных обзоров, недоступных ранее.

В первой части Главы 1 мы представляем новое поколение расширенного каталога галактик, основанного на совокупности данных обзоров SDSS, *GALEX* и UKIDSS, также включающего в себя комплексный анализ линий поглощения и излучения в спектрах галактик. Наша основная мотивация заключается в использовании синергии, обеспеченной совмещением наборов панхроматических данных, для внегалактической астрофизики: оптический диапазон лучше всего изучен и для него существуют хорошо откалиброванные модели звездных населений; потоки в ультрафиолетовой области чувствительны даже к малой доле недавно образовавшихся звезд и поэтому содержат ценную информацию об истории звездообразования; область ближнего ИК значительно менее чувствительна к внутреннему пылевому покраснению и возрастам звездных населений, поэтому может обеспечить хорошие оценки звездных масс. Наша задача заключается в построении справочной спектrophотометрической базы данных в широком диапазоне длин волн, дополненной детальной информацией о свойствах галактик, так что она позволит астрономам изучать

образование и эволюцию галактик на красных смещениях $z = 0.0\text{--}0.6$ явным образом с минимальными дополнительными манипуляциями, насколько это возможно.

Мы предоставляем: а) первый однородный набор данных распределений энергии в спектрах (spectral energy distributions, SED) галактик на малых и средних красных смещениях, исправленных за собственные движения, в диапазоне длин волн от УФ до ближнего ИК; б) первый фотометрический набор собственных апертурных SED с соответствующими спектрами и анализом звездных населений: дисперсии скоростей, параметрические истории звездообразования; в) первый последовательный анализ абсорбционных и эмиссионных линий в спектрах галактик из SDSS, включающий параметрическую и непараметрическую аппроксимацию профилей эмиссионных линий; г) легкий и многофункциональный доступ к каталогу и нескольким дополнительным базам данных, содержащим морфологическую и структурную информацию для галактик выборки — через веб-сайт и интерфейсы Виртуальной Обсерватории (VO).

Мы начали эту работу в 2009 году с разработки нового подхода к коррекции спектров галактик за красное смещение, рассчитывая аналитические приближения k -поправок в оптических и ближних ИК полосах (Chilingarian et al., 2010). Затем мы расширили наш алгоритм на фотометрические полосы *GALEX FUV* и *NUV* и обнаружили универсальное соотношение между *NUV* и оптическими цветами галактик и их светимостями (см. Раздел 3.1 и Chilingarian & Zolotukhin, 2012). Мы также обработали спектры SDSS, используя новейшие модели звездных населений, получили дисперсии скоростей, возраста и металличности звезд и предоставили наши данные проекту калибровки фундаментальной плоскости галактик (Djorgovski & Davis, 1987) по данным SDSS (Saulder et al., 2013). Наша выборка также помогла отождествить массивные компактные галактики ранних типов на средних красных смещениях (Damjanov et al., 2013, 2014). И, наконец, мы, используя сложный набор критериев, обнаружили большую выборку компактных эллиптических галактик (см. Раздел 3.2 и Chilingarian & Zolotukhin, 2015), считавшихся ранее крайне редкими.

Обзоры неба играют важную роль не только в оптической астрономии. В рентгеновском диапазоне они также служат основным источником данных для исследования различных популяций источников. Для рентгеновских телескопов характерно сравнительно большое поле зрения, поэтому каждое наблюдение какого-либо объекта приводит к регистрации соседних с ним источников и зачастую получения для каждого из них такого же объема информации, как и для цели наблюдения. Начиная с рентгеновской обсерватории *Einstein* из архивов таких индивидуальных целевых наблюдений компилировались обзоры неба. Составленные по ним каталоги “случайно попавших в поле зрения” (*serendipitous*) рентгеновских источников (например, EMSS: Gioia et al. (1990); WGACAT: White et al. (1994); ROSAT 2RXP: Voges et al. (1999); ASCA AMSS: Ueda et al. (2005)) легли в основу многочисленных успешных исследований объектов различной природы в Галактике и за ее пределами.

Благодаря непревзойденному сочетанию эффективной площади телескопа и большого поля зрения одним из наиболее удачных рентгеновских инструментов с точки зрения обзоров неба является космическая обсерватория *XMM-Newton* (Jansen et al., 2001) — вторая большая миссия программы Horizon 2000 Европейского Космического Агентства. Обсерватория была запущена в декабре 1999 года и имеет эффективную собирающую площадь $\sim 1500 \text{ см}^2$ (Turner et al., 2001) у каждого из трех рентгеновских телескопов на ее борту.

Спустя более чем полтора десятилетия она по-прежнему является самым чувствительным рентгеновским прибором (Longinotti, 2014). Расширенный рабочий диапазон энергии камер *XMM-Newton* (0.2–12 кэВ) позволяет наблюдать поглощенные источники и объекты с жестким спектром, недоступные многим другим (в частности более ранним) телескопам, работавшим в мягком рентгеновском диапазоне. В совокупности с большим полем зрения в 30' эти свойства *XMM-Newton* приводят к тому, что на каждой экспозиции в среднем регистрируется от 50 до 100 рентгеновских объектов помимо непосредственной цели наблюдения (Watson et al., 2009).

Начиная с 1997 года Научный Центр Обзора *XMM-Newton* (*XMM-Newton* Survey Science Centre⁴, SSC) — консорциум из 10 европейских институтов (Watson et al., 2001) — разрабатывал программный пакет SAS (Science Analysis Software, SAS) (Gabriel et al., 2004) для обработки и анализа данных *XMM-Newton*. На основе SAS были собраны пакеты для автоматизированной обработки данных и создания каталогов всех объектов, когда-либо зарегистрированных в наблюдениях на *XMM-Newton*. Ранние версии каталогов рентгеновских источников, зафиксированных тремя камерами EPIC (Strüder et al., 2001; Turner et al., 2001), размещенными в фокальной плоскости трех рентгеновских телескопов, последовательно обозначались 1XMM и 2XMM (Watson et al., 2009), а их инкрементальные версии получали суффикс -DR с последовательным номером релиза.

Каталоги источников *XMM-Newton* играют ключевую роль в самых разнообразных исследованиях. Так представляют значительный интерес открытия событий приливного разрушения звезд черными дырами (например, Khabibullin & Sazonov, 2014; Lin et al., 2016), исследования рентгеновских свойств горячих OB звезд (например, Nazé, 2009) и переменности активных ядер галактик (например, González-Martín & Vaughan, 2012). Наиболее заметной работой на основе данных каталогов *XMM-Newton* стало открытие первого гипер-яркого рентгеновского источника со светимостью, достигающей $L_X = 10^{42}$ эрг с⁻¹, ставшего одним из лучших кандидатов в черные дыры промежуточных масс (Farrell et al., 2009; Webb et al., 2012).

Последний на текущий момент третий каталог *XMM-Newton* (Rosen et al., 2016), включивший в себя 15 лет наблюдений и ставший крупнейшим из когда-либо созданных рентгеновских каталогов, мы описываем во второй части настоящей главы. Научные исследования на его основе в настоящей диссертации представлены в Главах 2 и 4.

1.1 Каталог RCSED распределений энергии в спектрах галактик

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работе Chilingarian et al. (2016).

Мы представляем RCSED (the value-added Reference Catalog of Spectral Energy Distributions of galaxies) — расширенный справочный каталог распределений энергии в спектрах галактик, содержащий однородные спектрофотометрические данные для 800 299 галактик на малых и средних красных смещениях ($0.007 < z < 0.6$), выбранных из обзора SDSS. Удобные веб-сервисы в Виртуальной Обсерватории (ВО) и полученная новейшими методами анализа дополнительная подробная информация о свойствах галактик, позволяет изучать при помощи RCSED процессы формирования и эволюции галактик за последние 5 млрд. лет. Наш каталог RCSED включает в себя а) исправленные за k -

⁴<http://xmmssc.irap.omp.eu/>

поправки фотометрические измерения во всех 11 ультрафиолетовых, оптических и ближних инфракрасных полосах, доступных в обзорах *GALEX*, *SDSS* и *UKIDSS*; б) результаты определения свойств звездных населений галактик по спектрам *SDSS*, включающие дисперсии скоростей; параметрические истории звездообразования; звездные металличности, вычисленные для моделей мгновенных вспышек звездообразования и экспоненциально затухающего звездообразования; в) параметрические и непараметрические потоки и профили эмиссионных линий и оценки металличности газа. Также мы представляем таблицу преобразований цвета для галактик различных морфологических типов и светимостей и аналитические выражения для формы красной последовательности на диаграмме цвет–величина (color–magnitude diagram, CMD) в разных цветах. RCSED также был связан с морфологической классификацией галактик *Galaxy Zoo* и результатами фотометрической балдж+диск декомпозиции галактик по [Simard et al. \(2011\)](#). В данном разделе мы обсуждаем, сравнивая с литературой, систематические расхождения свойств галактик, представленных в нашем каталоге, на примере зависимостей цвет–величина, Фабера–Джексона, масса–металличность. RCSED доступен через веб-сайт проекта, а также с помощью средств ВО. Мы приводим несколько примеров SQL запросов к базе данных с нашим каталогом. Наконец, кратко обсуждаются настоящие и будущие научные приложения RCSED и перспективы расширения каталога на бóльшие красные смещения и дополнительные диапазоны длин волн.

Эта часть Главы 1 организована следующим образом: в Разделе 1.1.1.1 описано устройство каталога, включая сопоставление трех исходных каталогов по координатам, дополнение RCSED данными из других источников, анализ абсорбционных и эмиссионных линий по спектрам *SDSS*; в Разделе 1.1.2 представлены фотометрические свойства выборки и полученные средние цвета галактик различных морфологических типов; в Разделе 1.1.3 разобраны результаты нашего анализа спектров; Раздел 1.1.4 содержит описания интерфейсов доступа к каталогу; в Разделе 1.1.6 подводятся итоги работы.

1.1.1 Устройство каталога

1.1.1.1 Выборка объектов и используемые источники данных.

Мы составили фотометрический каталог по данным из нескольких общедоступных источников. Его основой стали объекты из спектральной выборки 7-го релиза данных (Data Release 7, DR7) обзора *SDSS* ([Abazajian et al., 2009](#)) — неактивные галактики (отмеченные в базе данных как `GAL_EM` или `GALAXY`) на красных смещениях $0.007 \leq z < 0.6$. Точный запрос к базе данных, который использовался для выбора объектов в веб-сервисе *SDSS CasJobs*⁵, приведен в Разделе 1.1.5. Этот запрос выдал 800 299 записей. Мы намеренно исключили квазары и сейфертовские галактики I типа (`specclass='QS0'`), потому что для них не существует корректных методов фотометрической k -коррекции и алгоритмов анализа звездного населения. Полученная таблица использовалась для поиска соответствий по координатам в данных обзорах *GALEX DR6* ([Martin et al., 2005](#)) и *UKIDSS DR10* ([Lawrence et al., 2007](#)).

Для отождествления объектов из основной выборки с *UKIDSS* мы выбрали наилучшие совпадения по координатам из каталога *UKIDSS Large Area Survey* расположенные не далее, чем $3''$ на небе. Этот запрос был выполнен с использованием программного до-

⁵<http://skyserver.sdss3.org/CasJobs/>

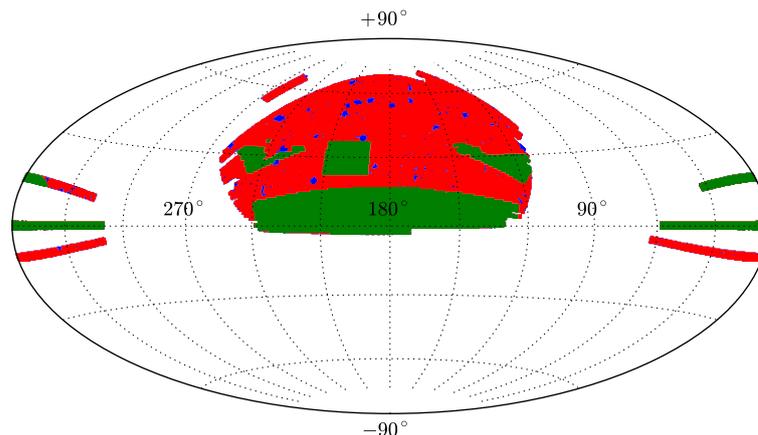


Рис. 1.1: На проекции неба Аитофа в экваториальных координатах показана область охвата нашего каталога. Зеленый цвет обозначает наличие всех трех фотометрических наборов данных: SDSS, UKIDSS, и *GALEX*; красный — SDSS и *GALEX*; синий — только SDSS. На карту нанесены объекты, имеющие хотя бы одно фотометрическое измерение в указанных обзорах.

ступа к сервису ConeSearch на веб-сайте архива данных WFCAM⁶, поддерживающему протокол “multi-cone”, разработанный Альянсом Международной Виртуальной Обсерватории (International Virtual Observatory Alliance, IVOA). Запрос вернул 280 870 галактик из UKIDSS, совпадающих с объектами нашей основной выборки. Для отождествления таблиц и доступа к данным UKIDSS мы использовали программу STILTS (Taylor, 2006).

На следующем шаге мы загрузили таблицу с исходными галактиками SDSS в веб-сервис *GALEX* CasJobs⁷ и нашли наилучшее совпадение в пределах углового расстояния 3" для каждой галактики по аналогии с UKIDSS. Этот запрос выдал 485 996 объектов из *GALEX*.

В результате такого отбора путем отождествления объектов из трех обзоров неба по координатам мы получили каталог из 800 299 галактик со спектроскопическими данными SDSS, из которых 90 717 имеют фотометрические измерения во всех 11 полосах (две *GALEX* *FUV* и *NUV*, 5 SDSS *ugriz* и 4 UKIDSS *YJHK*), 163 709 имеют измерения во всех фильтрах UKIDSS и хотя бы одну полосу в УФ, и 582 534 — хотя бы одну дополнительную к SDSS полосу фотометрии. На Рис. 1.1 изображена область покрытия нашего каталога на небе в проекции Аитофа. Разными цветами отмечены области покрытия всех трех использованных обзоров. Статистика галактик с измерениями в разных фотометрических полосах представлена в Таблице 1.1.

Затем мы дополнили каталог, содержащий спектрофотометрические данные, общедоступными наборами информации с наиболее широко используемыми параметрами галактик: а) результатами двумерной декомпозиции профилей яркости галактик SDSS Simard et al. (2011), включающими структурные параметры для всех объектов нашего каталога; б) морфологической классификацией из проекта Galaxy Zoo (Lintott et al., 2008, 2011), представляющей выполненную вручную классификацию пространственно разрешенных галактик.

⁶<http://surveys.roe.ac.uk/wsa/>

⁷<http://galex.stsci.edu/casjobs/>

Фотометрические полосы	Количество галактик
SDSS <i>ugriz</i>	799783
<i>GALEX FUV</i> + <i>ugriz</i>	286570
<i>GALEX NUV</i> + <i>ugriz</i>	469419
<i>FUV</i> + <i>NUV</i> + <i>ugriz</i>	270152
<i>ugriz</i> + UKIDSS <i>Y</i>	270603
<i>ugriz</i> + UKIDSS <i>J</i>	265316
<i>ugriz</i> + UKIDSS <i>H</i>	272028
<i>ugriz</i> + UKIDSS <i>K</i>	273050
<i>ugriz</i> + <i>YJHK</i>	250608
<i>NUV</i> + <i>ugriz</i> + <i>YJHK</i>	157531
все 11 фильтров	90717

Таблица 1.1: Количество объектов в объединенной выборке с доступными фотометрическими измерениями из трех исходных каталогов.

1.1.1.2 Фотометрическая часть каталога

1.1.1.2.1 Петросьяновские и апертурные величины

Все три обзора неба, использованных для компиляции RCSED, содержат различные фотометрические измерения протяженных источников, в частности апертурные измерения для нескольких различных размеров апертур (*GALEX* и UKIDSS).

Для фотометрического анализа SED и построения масштабирующих соотношений с учетом светимости галактик требуются интегральные звездные величины. С этой целью мы использовали петросьяновские величины [Petrosian \(1976\)](#), доступные в SDSS и UKIDSS, поскольку они слабо зависят от формы профиля яркости галактики в отличие от *modelmags* (см. обсуждение в [Chilingarian & Zolotukhin, 2012](#)). Каталог *GALEX* предоставляет интегральные звездные величины близкие к петросьяновским для экспоненциальных профилей (т.е. дисковых галактик) и завышенные на величину до 0.2 зв. вел. для эллиптических галактик ([Yasuda et al., 2001](#)). Однако учитывая среднюю неопределенность по потоку в фильтре *GALEX NUV* для красных галактик порядка 0.3 зв. вел., этим отличием мы можем пренебречь.

С другой стороны, наша начальная выборка галактик была взята из SDSS, а все спектры SDSS DR7 получены в апертурах радиусом 3". Поэтому для количественного сравнения спектроскопических и фотометрических данных необходимо иметь звездные величины в 3" апертурах. Мы рассчитали апертурные величины для всех источников в *GALEX* и UKIDSS по доступным в них апертурным измерениям путем интерполирования потоков на 3" апертуру, используя SDSS *fibermags* для оптической части SED. Заметим, что пространственное разрешение обзора *GALEX* в полосе *NUV* составляет около 5", поэтому звездная величина в 3" апертуре будет немного недооценена для малых объектов.

Мы исправили полученные петросьяновские звездные величины и звездные величины в 3" апертуре за поглощение в Галактике, используя значения $E(B - V)$, вычисленные по карте поглощения [Schlegel et al. \(1998\)](#). Затем мы вычислили k -поправки для обоих наборов фотометрических измерений, используя аналитическое приближение, представленное в статье [Chilingarian et al. \(2010\)](#) и обновленное для *GALEX* в [Chilingarian & Zolotukhin](#)

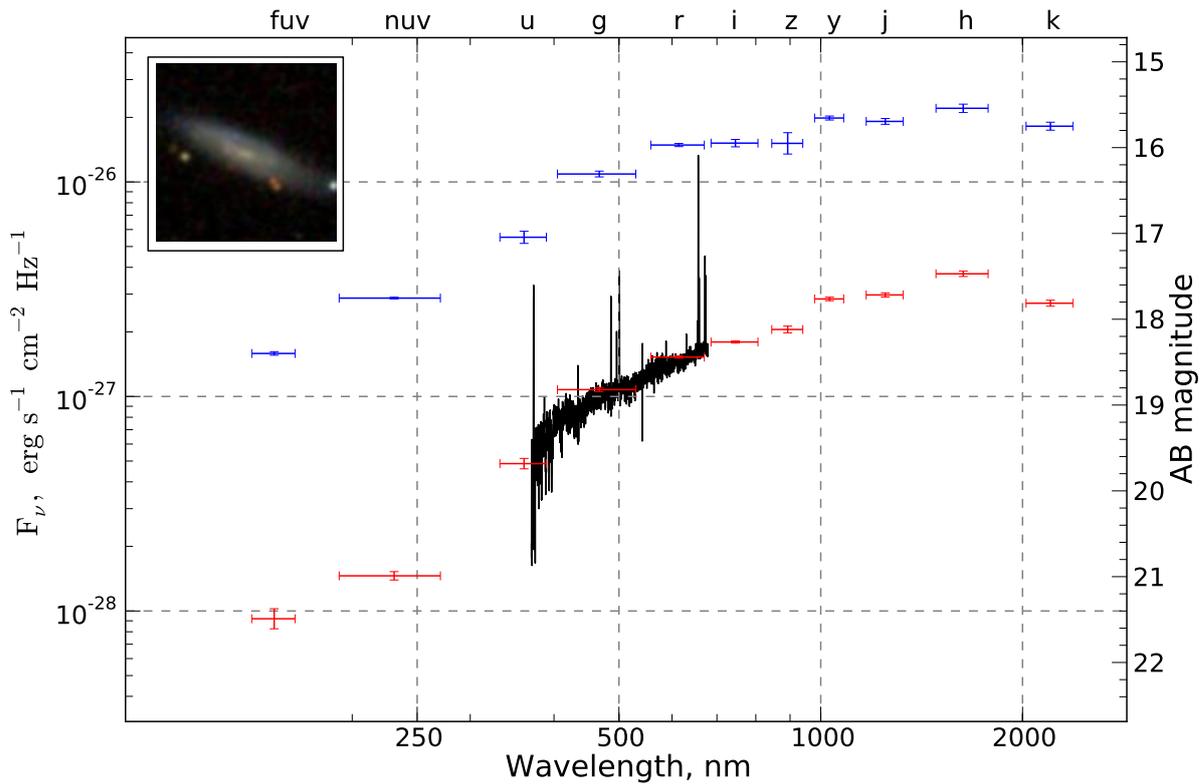


Рис. 1.2: Пример полностью исправленного SED в 11 полосах для спиральной галактики позднего типа на красном смещении 0.035. Синим и красным цветом отмечены интегральные (петросьяновские) звездные величины и звездные величины в апертуре $3''$, соответственно. Исправленный спектр SDSS построен для демонстрации типичного отличного согласия с исправленными фотометрическими измерениями галактики. Врезка в левом верхнем углу показывает оптическое изображение из SDSS в искусственных цветах размером $36 \times 36''$.

(2012).

На Рис. 1.2 приводится пример полностью исправленного спектра для спиральной галактики позднего типа ($z = 0.035$), имеющей измеренные потоки во всех 11 фильтрах. На диаграмме отмечены интегральные и апертурные звездные величины в системе AB , построен спектр из SDSS с длинами волн, приведенными к нулевому красному смещению. Можно видеть замечательное согласие между исправленной фотометрией и наблюдаемой спектральной плотностью потока, типичное для нашего каталога.

1.1.1.2.2 Исправление фотометрического расхождения SDSS–UKIDSS

Важной проблемой фотометрических измерений протяженных источников в каталоге UKIDSS является наблюдаемый разброс цветов, включающих разность фотометрических измерений SDSS в оптическом диапазоне и измерений UKIDSS в ближнем ИК диапазоне (например, $g - J$). Мы обнаружили это противоречие еще в работе Chilingarian et al. (2010), где были вынуждены применить к фотометрии UKIDSS эмпирическую коррекцию,

основанную на предположении о гладкости SED галактик. Мы вычислили цвета $z - Y$ интерполированием доступных измерений SED полиномом низкого порядка. Однако такой подход требует наличия измерения потока в фильтре Y в каталоге UKIDSS.

Здесь мы предлагаем более общее и простое решение. Мы использовали фотометрический каталог UKIDSS Galactic Cluster Survey, содержащий измерения потоков в полосе Z . Применяя известные формулы преобразования цвета (Hewett et al., 2006), мы перевели Z в потоки в полосе z SDSS. Вслед за этим мы сравнили получившиеся значения петросяновских звездных величин и звездных величин в $3''$ апертуре с измеренными значениями в фильтре z из каталога SDSS DR7. Оказалось, что: а) разность интегральных петросяновских звездных величин $z_{\text{SDSS,Petro}} - z_{\text{UKIDSS,Petro}}$ коррелирует со средней поверхностной яркостью галактик; б) разность величин $3''$ апертуре $z_{\text{SDSS,fb}} - z_{\text{UKIDSS,3''}}$ близка к нулю с разбросом 0.02 зв. вел.; в) разности между петросяновскими и $3''$ звездными величинами во всех фильтрах ($ZYJHK$) UKIDSS практически идентичны, что указывает на фактически плоские профили цвета в инфракрасном диапазоне для большинства галактик. Это наводит на мысль, что поправку к петросяновской звездной величине в UKIDSS можно посчитать как: $\Delta(\text{mag}_{\text{UKIDSS,Petro}}) = (z_{\text{SDSS,fb}} - z_{\text{SDSS,Petro}}) - (Y_{\text{UKIDSS,3''}} - Y_{\text{UKIDSS,Petro}})$. Для объектов, у которых недоступен фильтр Y UKIDSS, мы использовали другие доступные полосы фотометрии из обзора (J , H или K).

Мы делаем вывод, что различие петросяновских звездных величин в каталогах SDSS и UKIDSS возникает в результате сложностей с обнаружением галактик низкой поверхностной яркости, что является следствием относительно коротких экспозиций UKIDSS и значительным переменным уровнем фона неба в ближнем ИК диапазоне. Поэтому петросяновские радиусы и звездные величины галактик в обзоре UKIDSS недооценены. Следовательно, сравнение оригинальных звездных величин UKIDSS для протяженных источников с фотометрией SDSS и *GALEX* становится некорректным. Наш подход решает эту проблему эмпирически.

Таким образом, в нашем каталоге RCSED мы предоставляем полностью исправленные за систематические эффекты распределения энергии в спектрах галактик, приведенные к нулевым красным смещениям, интегральные звездные величины и величины в $3''$ апертурах для большой выборки галактик.

1.1.1.3 Спектральная часть каталога: абсорбционные линии

Мы проанализировали все спектры галактик из обзора SDSS методом попиксельной аппроксимации NBURSTS (Chilingarian et al., 2007a,b) и определили лучевые скорости v , дисперсии скоростей звезд σ и историю звездообразования, параметризованную в рамках двух моделей: а) модель мгновенной вспышки звездообразования (Simple Stellar Population, SSP) и б) модель экспоненциально затухающего темпа звездообразования (exp-SFH).

Подход NBURSTS заключается в нелинейной минимизации невязки χ^2 между наблюдаемым и модельным спектрами методом Левенберга-Марквардта. Предварительным шагом в этом подходе является свертка сетки моделей звездных населений с инструментальным контуром спектрографа, который доступен для всех исходных спектров SDSS. Внутри цикла нелинейной χ^2 минимизации сначала извлекается спектр модельного звездного населения для текущих значений SSP возраста и металличности путем двумерной интерполяции сетки моделей звездных населений. Для exp-SFH моделей вместо возраста используется параметр шкалы экспоненциального затухания темпов звездообразования.

Далее модельный спектр звездного населения сворачивается с распределением звезд на луче зрения (line-of-sight velocity distribution, LOSVD), параметризованным в виде функции Гаусса–Эрмита с параметрами $v, \sigma, h3, h4$. И, наконец, модельный спектр умножается на мультипликативный континуум, задаваемый полиномом Лежандра низкого порядка (эти параметры определяются линейно внутри нелинейного цикла минимизации), чтобы учесть эффекты внутреннего поглощения в галактике и возможных неточностей в калибровке спектральных потоков наблюдаемого и модельного спектров. Таким образом, процедура минимизации возвращает параметры наилучшей модели $v, \sigma, h3, h4, t, [Fe/H]$, где t – это возраст вспышки звездообразования в модели SSP и шкала экспоненциального затухания темпов звездообразования в exp-SFH модели, и коэффициенты полинома мультипликативного континуума. Здесь мы используем чисто гауссову форму LOSVD с $h3 = h4 = 0$.

Попиксельный подход аппроксимации спектров позволят легко маскировать области вокруг ярких атмосферных линий (O I, Na D, OH и т.д.), и полосы теллурической абсорбции, в которых находятся систематические артефакты редукции спектров SDSS.

При обнаружении эмиссионных линий в самой галактике мы запускали вторую итерацию аппроксимации спектра, где исключали из анализа участки 8–14 Å вокруг найденных ярких линий.

Мы использовали три сетки моделей звездных населений:

1. SSP-модели, рассчитанные эволюционным кодом PEGASE.HR (Le Borgne et al., 2004) на основе звездной библиотеки эмпирических спектров высокого разрешения ($R=10000$) ELODIE.3 (Prugniel & Soubiran, 2004; Prugniel et al., 2007), покрывающей диапазон по длинам волн $3900 < \lambda < 6800$ Å, по металличностям $-2.5 < [Fe/H] < 0.5$ dex и по возрастам $20 < t < 20000$ млн. лет.
2. Модели с экспоненциально затухающей историей звездообразования (exp-SFH) с постоянной металличностью, рассчитанные кодом PEGASE.HR в том же диапазоне металличностей и длин волн, как SSP модели. В этой сетке моделей шкала экспоненциально спадающей истории звездообразования находится в диапазоне $10 < \tau < 20600$ млн. лет (последний предел соответствует постоянному темпу звездообразования). В моделях считается, что звездообразование началось вскоре после зарождения Вселенной, для галактик на различных красных смещениях $0 < z < 1.5$ это соответствует возрасту Вселенной от 4.3 млрд. лет до 13.8 млрд. лет. В отличие от SSP моделей, где используется одна модельная сетка для всех объектов, здесь требуется расчет сетки τ – $[Fe/H]$ для каждой галактики индивидуально, в соответствии ее красному смещению, предполагая, что звездообразование началось сразу после рождения Вселенной. Например, для галактики на $z = 0.2$ (время распространения света составляет 2.45 млрд. лет) мы посчитали сетку моделей для звездообразования, начавшегося 11.27 млрд. лет назад в стандартной космологической модели WMAP9 (Hinshaw et al., 2013).
3. SSP-модели среднего разрешения ($R = 2300$), рассчитанные кодом PEGASE.HR на основе эмпирической звездной библиотеки MILES (Sánchez-Blázquez et al., 2006) и покрывающие диапазоны по длинам волн $3600 < \lambda < 7400$ Å, по металличностям $-2.5 < [Fe/H] < 0.7$ dex и возрастам $20 < t < 20000$ млн. лет.

SSP возрасты звездных населений старше 14 млрд. лет и экспоненциальные шкалы $\tau < 1$ млрд. лет следует рассматривать как верхний или нижний пределы параметров соответственно.

В каталога мы предоставляем для каждой галактики два набора параметров звездных населений: 1) SSP-возрасты и металличности, полученные при аппроксимации спектров в диапазоне длин волн $4500 < \lambda < 6795 \text{ \AA}$ (в собственной системе отсчета), используя модели MILES-PEGASE.HR с мультипликативным полиномиальным континуумом 5-й степени; 2) параметры модели экспоненциально затухающей истории звездообразования, рассчитанные по диапазону спектра $3915 < \lambda < 6795 \text{ \AA}$ с континуумом в виде полинома 19-й степени. В работе [Chilingarian et al. \(2008\)](#) показано, что 19-я степень соответствует оптимальному эмпирическому значению степени мультипликативного полиномиального континуума для спектров SDSS. Мы выполнили SSP аппроксимацию моделями MILES-PEGASE.HR в сокращенном спектральном диапазоне длин волн с очень низкой степенью полиномиального континуума для того, чтобы минимизировать артефакты возникающие из-за несовершенства сетки SSP-моделей (см. Раздел 4.2). Результаты аппроксимации SDSS спектров моделями звездных населений MILES-PEGASE.HR в диапазоне длин волн $3600 < \lambda < 6790 \text{ \AA}$ публично доступны через протокол Виртуальной Обсерватории SSA (Simple Spectrum Access). Мы сделали открытый доступ именно к этому варианту анализа спектров галактик, чтобы у пользователей каталога была возможность независимого изучения эмиссионных линий, включая дуплет [OII] 3727 \AA , которые фактически являются остатками вычитания модели звездного населения из наблюдаемого спектра объекта.

1.1.1.4 Спектральная часть каталога: эмиссионные линии

Процедура аппроксимации спектров превосходно описывает звездный континуум каждой галактики наилучшей моделью звездного населения (см. Рис. 1.3). Вычитая модель звездного абсорбционного континуума из наблюдаемого спектра мы получаем чистый эмиссионный спектр ионизованного газа, который не подвержен влиянию абсорбционного компонента, что особенно важно для бальмеровских линий. Точность определения звездного континуума в нашем анализе позволяет восстанавливать слабые эмиссионные линии на уровне нескольких процентов от интенсивности континуума, которые зачастую не обнаруживаются в результате оригинальной редукции SDSS. В Таблице 1.2 мы показываем статистику по обнаружению эмиссионных линий в каталоге RCSED.

Для измерения потоков и эквивалентных ширин (equivalent width, EW) эмиссионных линий мы применили два различных подхода: аппроксимация линий в виде гауссиан и подход непараметрического восстановления профилей эмиссионных линий.

В некоторых галактиках профили эмиссионных линий не могут быть описаны гауссианами. Обычно это встречается в галактиках с активным ядром или в галактиках с сильным истечением вещества из центральной части (outflow) галактики, например, в результате чрезвычайно сильной вспышки звездообразования. Аппроксимация эмиссионных линий в таких галактиках гауссовым профилем будет приводить к неверным оценки потоков и кинематическим параметрам. Для работы с такими объектами мы использовали метод непараметрической аппроксимации, позволяющий восстанавливать профили линий произвольной формы и проводить измерения потоков с высокой точностью. Такой подход требует наличия в спектре как минимум нескольких линий с достаточно высоким отношением сигнал/шум, в противном случае этот подход может приводить к систематическим

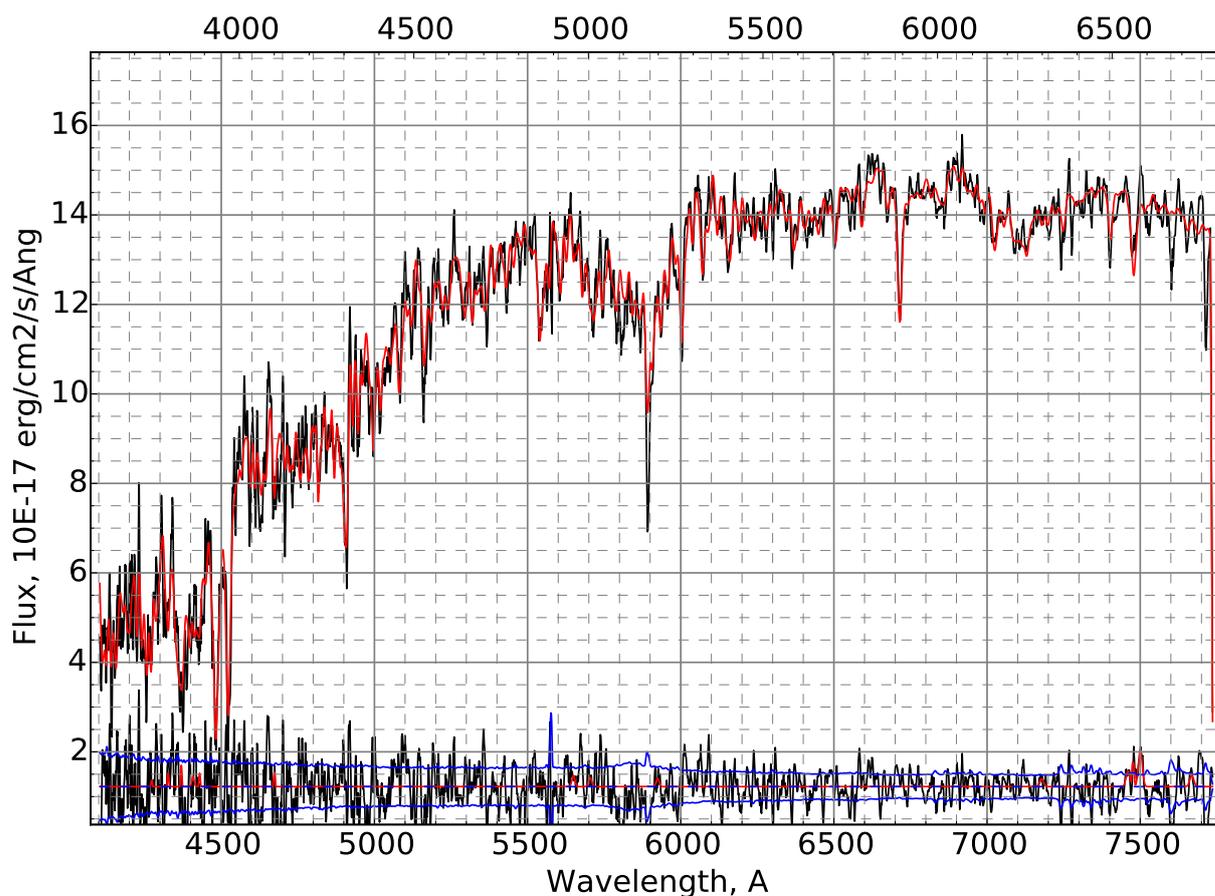


Рис. 1.3: Пример результата аппроксимации наблюдаемого спектра методом NBURSTS для галактики раннего типа из SDSS. Наблюдаемый спектр показан черным, результат аппроксимации — красным, невязки — синим. Наблюдаемые длины волн показаны снизу, а сверху графика показаны длины волн в собственной системе отсчета.

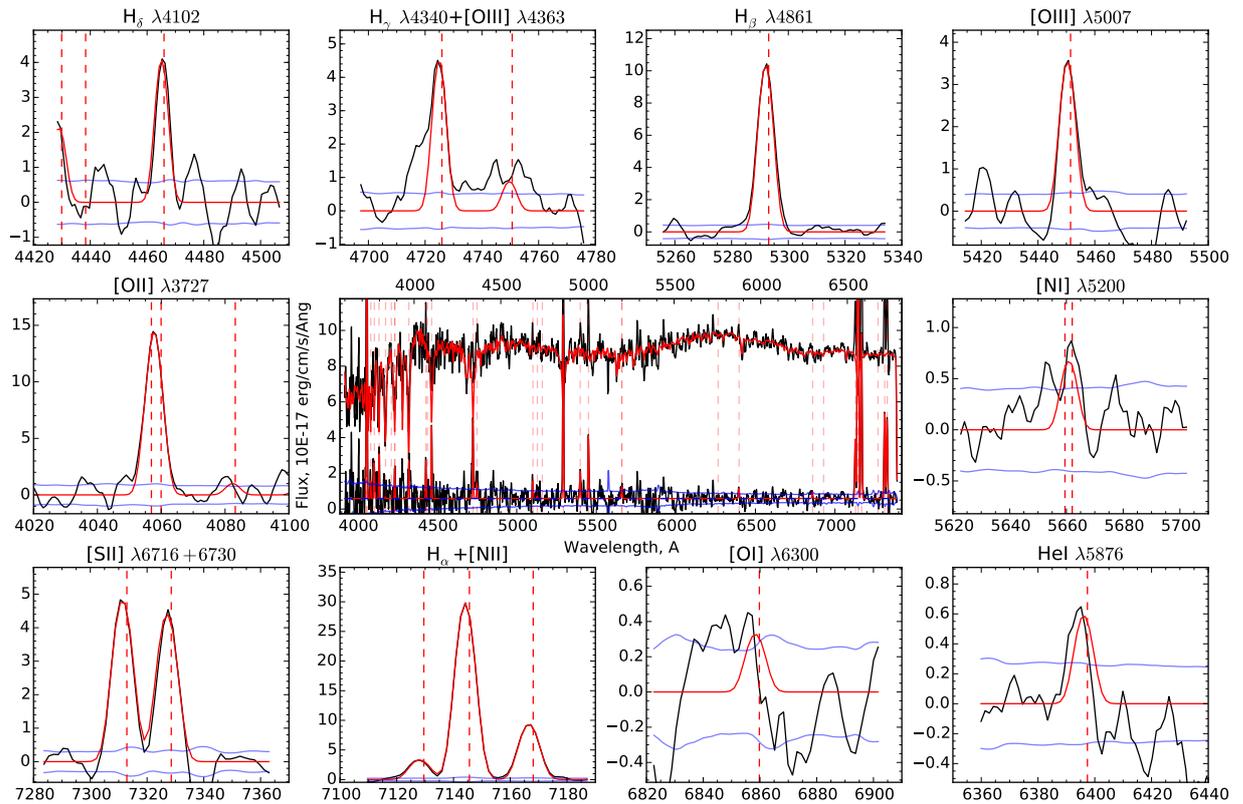


Рис. 1.4: Пример аппроксимации спектра процедурой NBURSTS для галактики позднего типа из SDSS вместе с профилями эмиссионных линий. Центральная панель идентична Рис. 1.3, графики по бокам показывают эмиссионные линии после вычитания наилучшей модели абсорбционного континуума (черная линия) и наилучшую аппроксимацию линий гауссовым профилем (красная линия). Синим цветом показаны неопределенности потоков в эмиссионных линиях. Вертикальные красные пунктирные линии изображают положения эмиссионных линий в предположении красного смещения, взятого из базы данных SDSS.

ошибкам измерений потоков. Поэтому, мы также использовали “классический” подход к аппроксимации эмиссионных линий гауссовыми профилями. Подробное описание непараметрического подхода к анализу эмиссионных линий представлено в статьях [Chilingarian et al. \(2016\)](#) и [Katkov et al. \(в работе\)](#).

Результаты применения обоих подходов к анализу эмиссионных линий представлены в таблицах каталога RCSED и в индивидуальных FITS (Flexible Image Transport System) файлах с результатами анализа каждого спектра, содержащих дополнительные параметры анализа, не включенные в общие таблицы (подробнее см. сайт каталога <http://rcsed.sai.msu.ru/>).

Линия	Длина волны Å	Обозначение	Обнаружена N	SNR > 1		SNR > 3		SNR > 5		SNR > 10	
				N	часть	N	часть	N	часть	N	часть
[O II]	3726.03	f3727_oii	780665	543374	69.6%	354307	45.4%	225669	28.9%	92161	11.81%
[O II]	3728.82	f3730_oii	782417	562707	71.9%	387264	49.5%	257713	32.9%	110287	14.10%
Hκ	3750.15	f3751_h_kappa	791720	233850	29.5%	26219	3.3%	5584	0.7%	535	0.07%
Hι	3770.63	f3772_h_iota	796081	180306	22.6%	18912	2.4%	4524	0.6%	595	0.07%
Hθ	3797.90	f3799_h_theta	798386	229961	28.8%	31590	4.0%	8466	1.1%	1345	0.17%
Hη	3835.38	f3836_h_eta	798565	255213	32.0%	52680	6.6%	16876	2.1%	2976	0.37%
[Ne III]	3868.76	f3870_neiii	798635	246202	30.8%	45733	5.7%	19500	2.4%	7579	0.95%
He I	3887.90	f3889_hei	798674	182764	22.9%	37166	4.7%	10644	1.3%	1328	0.17%
Hζ	3889.07	f3890_h_zeta	798675	223107	27.9%	63940	8.0%	26166	3.3%	6072	0.76%
Hε	3970.08	f3971_h_epsilon	798835	360759	45.2%	156226	19.6%	78430	9.8%	21312	2.67%
[S II]	4068.60	f4070_sii	799003	202235	25.3%	14766	1.8%	2352	0.3%	149	0.02%
[S II]	4076.35	f4078_sii	799010	149342	18.7%	4755	0.6%	517	0.1%	55	0.01%
Hδ	4101.73	f4103_h_delta	799043	342858	42.9%	172913	21.6%	96748	12.1%	32463	4.06%
Hγ	4340.46	f4342_h_gamma	799276	419668	52.5%	275775	34.5%	192540	24.1%	87637	10.96%
[O III]	4363.21	f4364_oiii	799293	118667	14.8%	8001	1.0%	2569	0.3%	787	0.10%
He II	4685.76	f4687_heii	799381	109369	13.7%	6779	0.8%	2204	0.3%	614	0.08%
[Ar IV]	4711.37	f4713_ariv	799381	79310	9.9%	3477	0.4%	530	0.1%	110	0.01%
[Ar IV]	4740.17	f4742_ariv	799380	118077	14.8%	7031	0.9%	1108	0.1%	85	0.01%
Hβ	4861.36	f4863_h_beta	799375	514321	64.3%	381556	47.7%	317350	39.7%	214953	26.89%
[O III]	4958.91	f4960_oiii	799372	449021	56.2%	164285	20.6%	92442	11.6%	47287	5.92%
[O III]	5006.84	f5008_oiii	799371	638852	79.9%	404135	50.6%	244845	30.6%	119215	14.91%
[N I]	5197.90	f5199_ni	799360	144430	18.1%	9742	1.2%	1345	0.2%	178	0.02%
[N I]	5200.25	f5202_ni	799360	184255	23.1%	16318	2.0%	2676	0.3%	226	0.03%
[N II]	5754.59	f5756_nii	799131	196670	24.6%	12800	1.6%	2763	0.3%	966	0.12%
He I	5875.62	f5877_hei	798546	260312	32.6%	81904	10.3%	38829	4.9%	12209	1.53%
[O I]	6300.30	f6302_oi	784763	439640	56.0%	177144	22.6%	77850	9.9%	16856	2.15%
[O I]	6363.78	f6366_oi	780219	285886	36.6%	40626	5.2%	9143	1.2%	1395	0.18%
[N II]	6548.05	f6550_nii	764832	596254	78.0%	422810	55.3%	289961	37.9%	133553	17.46%
Hα	6562.79	f6565_h_alpha	763451	614029	80.4%	531966	69.7%	479842	62.9%	395722	51.83%
[N II]	6583.45	f6585_nii	761376	641883	84.3%	553212	72.7%	479386	63.0%	334901	43.99%
He I	6678.15	f6679_hei	750612	178330	23.8%	21069	2.8%	6321	0.8%	1408	0.19%
[S II]	6716.43	f6718_sii	745687	571758	76.7%	423064	56.7%	320126	42.9%	186973	25.07%
[S II]	6730.81	f6733_sii	743742	554071	74.5%	374143	50.3%	263155	35.4%	135572	18.23%

Таблица 1.2: Статистика обнаружения эмиссионных линий (параметрическая Гауссова аппроксимация) на различных отношениях сигнал/шум. Столбец “Длина волны” показывает атмосферные длины волн. Столбец “Обозначение” представляет названия колонок соответствующих спектральных линий в FITS-таблицах каталога RCSED. В четвертом столбце содержится количество объектов, у которых обнаружены соответствующие линии.

1.1.1.4.1 Аппроксимация гауссовыми профилями

Этот подход состоит в одновременной аппроксимации всех эмиссионных линий, присутствующих в наблюдаемом спектре (см. список линий в Таблице 1.2). При этом скорости и дисперсии скоростей ионизованного газа для рекомбинационных и запрещенных линий считается независимо. Кинематические параметры ионизованного газа считаются путем нелинейного метода наименьших квадратов с помощью пакета программ MPFIT⁸. Потoki в эмиссионных линиях вычисляются линейно на каждом шаге цикла нелинейной минимизации по параметрам кинематики газа. Поскольку потоки в линиях не могут быть отрицательными мы использовали алгоритм BVLS (ограниченных переменных в методе наименьших квадратов) (Lawson & Hanson, 1995) в реализации М. Кашеллари⁹.

1.1.1.4.2 Газовые металличности

Мы использовали измеренные нами потоки в эмиссионных линиях для оценки металличности ионизованного газа в галактиках, где эта эмиссия соответствует фотоионизационному возбуждению молодыми звездами. Мы использовали два разных способа для оценки ме-

⁸<http://www.physics.wisc.edu/~craigm/idl/fitting.html>

⁹<http://www-astro.physics.ox.ac.uk/~mxc/software/bvls.pro>

талличности: а) новые калибровочные формулы для отношений ярких эмиссионных линий [Dopita et al. \(2016\)](#) и б) программу IZI ([Blanc et al., 2015](#)), в которой реализован в байесовский подход к поиску оптимальных параметров фотоионизационных моделей ([Dopita et al., 2013](#)) с ($\kappa = \infty$), где κ — распределенная энергия электронов. Для применения этих методов мы отобрали из каталога галактики, которые на диагностической ВРТ-диаграмме ([Baldwin et al., 1981](#)) попадают в область возбуждения молодыми звездами и область “переходного типа”, используя критерии из работы [Kauffmann et al. \(2003\)](#).

Калибровочные соотношения [Dopita et al. \(2016\)](#) используют только относительно яркие эмиссионные линии $H\alpha$, [NII] и [SII], находящиеся в весьма узком диапазоне спектра, и, поэтому, практически не чувствительны к поглощению в галактике. Однако недостатком такого подхода является то, что на красных смещениях $z > 0.1$ эти линии смещаются в области теллурической абсорбции и атмосферных линий излучения (в основном OH), что может заметно повлиять на качество оценок потоков в эмиссионных линиях и, соответственно, на оценки металличности ионизованного газа. Другое естественное ограничение данного подхода связано со спектральным диапазоном SDSS ($\lambda < 9200 \text{ \AA}$), что соответствует наибольшему красному смещению $z = 0.36$, когда запрещенная линия [SII] 6730 \AA выходит за пределы данного диапазона. Кроме того, калибровки рассчитаны для фиксированного значения [N/O] и, следовательно, чувствительны к возможным вариациям [N/H] в галактиках. В каталог включены оценки металличности ионизованного газа, рассчитанные на основе гауссовых измерений потоков в линиях с помощью калибровок [Dopita et al. \(2016\)](#) (таблица `rcsed_gasmet`). Ошибки металличностей газа рассчитаны на основе статистических ошибок в линиях.

Программа IZI ([Blanc et al., 2015](#)) имеет преимущество, которое заключается в том, что она принимает все доступные измерения эмиссионных линий и, следовательно, может быть использована для всей выборки галактик, входящих в каталог RCSED. Алгоритм IZI реализован в пакете программ на языке IDL, содержащий 17 различных сеток фотоионизационных моделей. Обратим внимание, что этот подход требует предварительного исправления потоков в эмиссионных линиях от внутреннего поглощения в галактиках. Также этот подход применим к галактикам, в которых доминирующим механизмом возбуждения газа является фотоионизация (аналогично методу [Dopita et al. \(2016\)](#)). Мы оценивали внутреннее поглощение в галактиках, используя типичное значение бальмеровского декремента $H\alpha/H\beta = 2,83$ ([Groves et al., 2012](#)), и соответственно исправляли потоки во всех эмиссионных линиях. В галактиках, где наблюдались меньшие значения $H\alpha/H\beta$, мы считали, что поглощение отсутствует. Наконец, исправленные потоки эмиссионных линий использовались в процедуре IZI с модельными сетками [Dopita et al. \(2013\)](#). Измеренные значения $12 + \log[\text{O}/\text{H}]$ и ионизационного параметра были включены в таблицу газовых металличностей `rcsed_gasmet` нашего каталога.

1.1.2 Фотометрические свойства выборки

1.1.2.1 Полнота выборки галактика на разных красных смещениях

Так как в нашем каталоге в качестве опорной выборки используется спектроскопическая выборка галактик из SDSS DR7, при этом фотометрическая часть обзора ограничена предельной звездной величиной $r = 17.77$ зв. вел. в $3''$ апертуре, мы исследовали вопрос полноты числа галактик путем построения функций светимости в зависимости от красно-

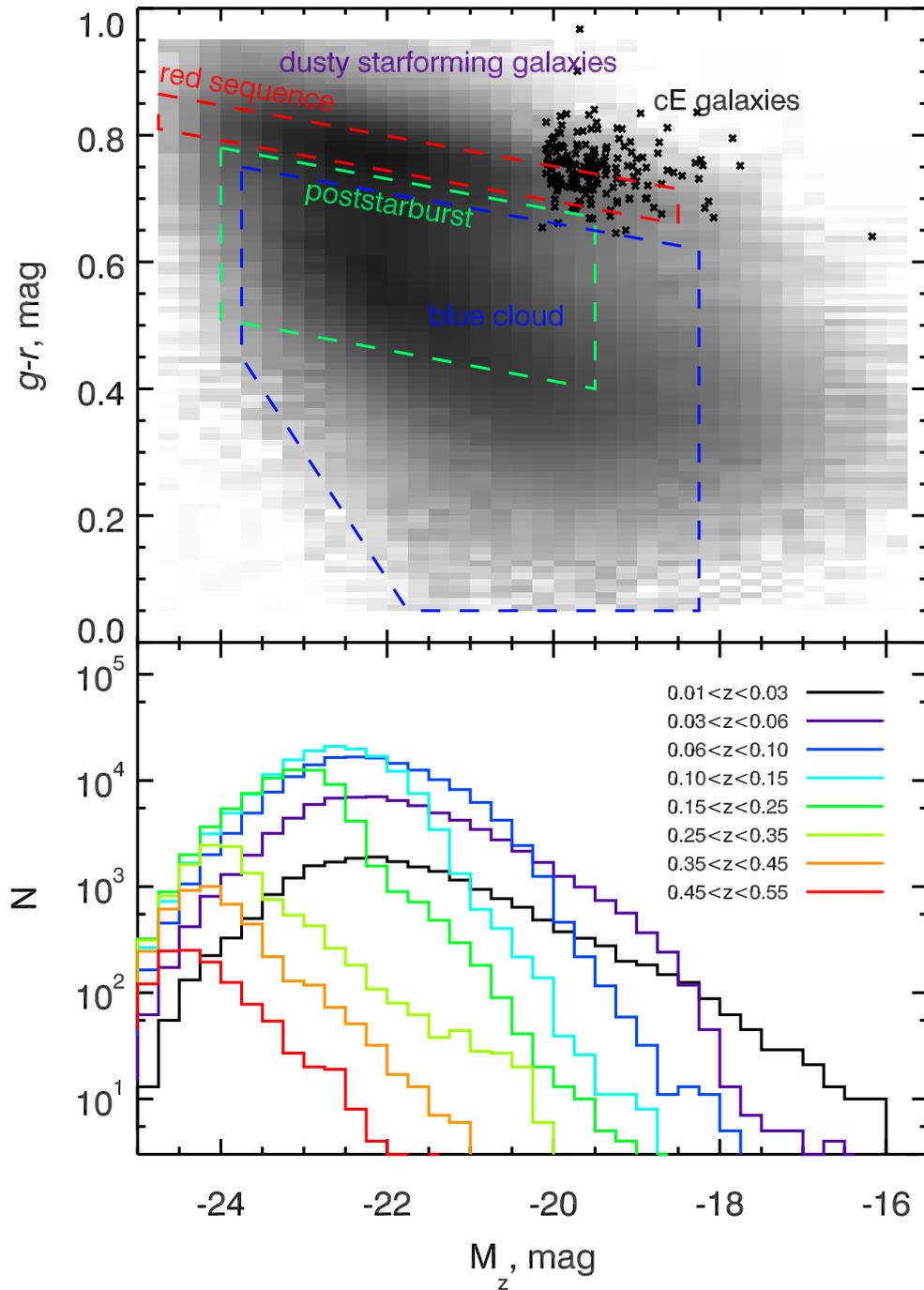


Рис. 1.5: (Вверху) Диаграмма цвет — петросьяновская звездная величина в оптическом диапазоне для всех галактик нашей выборки с учетом поглощения и k -поправок. (Внизу) Распределение количества галактик по абсолютным звездным величинам в разных диапазонах красных смещений.

го смещения. Также, существует проблема, связанная с отсутствием в спектроскопической части обзора SDSS возможности располагать световоды ближе $\simeq 15''$, из-за чего возникает систематическое разделение компактных кластеров и групп галактик.

На Рис. 1.5 (верхняя панель) мы показываем двумерное распределение галактик нашей выборки в пространстве цвет–величина ($M_z, g - r$). Мы отметили области, традиционно именуемые “красная последовательность” и “голубое облако”, а также местоположение типичных галактик (E+A) с недавно остановившимся звездообразованием. Цветом показана плотность, соответствующая количеству объектов из нашего каталога на данной позиции в пространстве параметров. Мы также обозначили маленькими крестиками компактные эллиптические галактики из выборки Chilingarian & Zolotukhin (2015), которые находятся систематически выше красной последовательности. Можно увидеть бимодальное распределение по цвету для галактик средних светимостей и карликовых галактик ($M_z > -20.5$ зв. вел.), в то время как для более ярких систем переход гладкий.

Несмотря на то, что карликовые галактики гораздо более многочисленны во Вселенной, чем гиганты, из-за подъема слабого конца функции светимости галактик (Schechter, 1976; Blanton et al., 2003b) мы наблюдаем явное уменьшение плотности галактик малой звездной величины. На нижней панели Рис. 1.5 мы приводим распределения галактик по светимостям для разных красных смещений. Спад на больших светимостях связан с характерной формой функции светимости, в то время как хвост слабых светимостей понижается из-за полноты SDSS и отсеивания сильно протяженных (и потому близких) галактик. Мы явно видим, как ограничение предельной звездной величины функции светимости SDSS вызывает падение числа галактик на все больших и больших светимостях по мере увеличения красного смещения. Рис. 1.5 показывает, что мы видим карликовые галактики ($M_z > -19.8$ зв. вел.) на $z < 0.06$, однако, для любого рода статистических исследований необходимо тщательным образом изучать эффекты селекции.

1.1.2.2 Красная последовательность в разных фотометрических полосах

На практике отбор кандидатов в галактики ранних типов, находящихся в скоплениях галактик, происходит по фотометрическим данным, поэтому важно знать форму красной последовательности в разных фотометрических полосах. Здесь мы предоставляем лучшую аппроксимацию формы красной последовательности полиномами второй степени для наборов цветов, охватывающих оптические и ИК полосы фотометрии.

Сначала мы собрали выборку галактик, находящихся на красной последовательности, по следующим критериям: 1) все объекты имеют $z < 0.27$; 2) применили ограничения на цвет $NUV - r$ так, чтобы отобрать на плоскости ($M_r, NUV - r$) объекты, расположенные выше прямой, проходящей через точки $p_0 = (-16.0; 3.5)$ зв. вел. и $p_1 = (-24.0; 5.0)$ зв. вел.; 3) применили ограничение для цвета $g - r$ для выбора объектов на плоскости ($M_r, g - r$), расположенных выше прямой, проходящей через точки $q_0 = (-16.0; 0.5)$ зв. вел. и $q_1 = (-24.0; 0.75)$ зв. вел., а также удовлетворяющие критерию $(g - r) < 0.95$ зв. вел..

Для того, чтобы учесть два порядка изменения величины плотности галактик вдоль красной последовательности, для любых комбинаций цвета и величины (например, $g - r$, M_r) мы выполнили следующее: 1) выбрали измерения звездных величин, имеющие статистические ошибки < 0.1 зв. вел. в обоих полосах; 2) разбили распределение по светимостям с шагом 0.5 зв. вел. и посчитали медианные значения цветов и робастные значения стандартного отклонения в каждом интервале; 3) аппроксимировали медианные значе-

ния полиномом второй степени, используя только те интервалы, в которых было не менее 15 объектов. Поскольку галактики нашей выборки в среднем находятся в интервале $-25 < M < -15$ зв. вел. в системе AB , то для удобства мы добавили константу 20.0 зв. вел. к величинам в красных оптических (riz) и ИК полосах перед аппроксимацией.

$$\begin{aligned}
(u - r) &= +2.51 - 0.065 \cdot M_{20r} - 0.005 \cdot M_{20r}^2; \sigma = 0.16 \\
(u - i) &= +2.90 - 0.069 \cdot M_{20i} - 0.007 \cdot M_{20i}^2; \sigma = 0.17 \\
(u - z) &= +3.15 - 0.050 \cdot M_{20z} - 0.014 \cdot M_{20z}^2; \sigma = 0.19 \\
(g - r) &= +0.75 - 0.026 \cdot M_{20r} - 0.001 \cdot M_{20r}^2; \sigma = 0.045 \\
(g - i) &= +1.12 - 0.038 \cdot M_{20i} - 0.003 \cdot M_{20i}^2; \sigma = 0.074 \\
(g - z) &= +1.39 - 0.044 \cdot M_{20z} - 0.009 \cdot M_{20z}^2; \sigma = 0.10 \\
(g - Y) &= +1.91 - 0.067 \cdot M_{20Y} - 0.018 \cdot M_{20Y}^2; \sigma = 0.14 \\
(g - J) &= +2.01 - 0.073 \cdot M_{20J} - 0.016 \cdot M_{20J}^2; \sigma = 0.18 \\
(g - H) &= +2.30 - 0.094 \cdot M_{20H} - 0.015 \cdot M_{20H}^2; \sigma = 0.19 \\
(g - K) &= +2.00 - 0.108 \cdot M_{20K} - 0.018 \cdot M_{20K}^2; \sigma = 0.22 \\
M_{20col} &= M_{col} + 20.0\text{mag}
\end{aligned} \tag{1.1}$$

Ур. 1.1 показывают наилучшие аппроксимации положения красной последовательности полиномами второй степени для 10 фотометрических полос. Мы учли среднее значение стандартного отклонения во всех используемых процедурой интервалах как “ширину красной последовательности” (σ в Ур. 1.1) и подчеркиваем, что остатки для медианных значений, как правило, на порядок меньше.

Мы отмечаем, что в широко используемых параметрических пространствах $(M_r, g - r)$, $(M_r, u - r)$, $(M_i, g - i)$, и $(M_z, g - z)$, красная последовательность не показывает сколько бы то ни было значительной кривизны, что указывает на незначительный вклад членов второго порядка. Это говорит о том, что не существует никакого “насыщения” красной последовательности на ярком конце.

1.1.2.3 Цветовые преобразования для галактик разных морфологических типов и светимостей

В работе [Chilingarian & Zolotukhin \(2012\)](#) показано, что хаббловская морфологическая классификация, сделанная вручную ([Fukugita et al., 2007](#)), превосходно коррелирует с полным $NUV - r$ цветом галактики. Дисперсия определения морфологического типа соответствует $0.8t$, где t — хаббловский тип, характерный для субъективной точности такой классификации. Здесь мы использовали эту зависимость для получения медианных значений цветов галактик через последовательность Хаббла для трех классов светимости, по значениям в полосе r .

Мы разделили плоскость цвет–величина $(M_r, NUV - r)$ на 18 четырехугольных частей, полагая, что морфологический тип для гигантских галактик ($M_r = -24$ зв. вел.) может быть оценен по линейной вариации цвета ($NUV - r$) от +0.5 до +6.5 зв. вел. с шагом в 1 зв. вел., соответствующим одному хаббловскому типу, от Sd до E . В то же время мы предположили, что для карликовых галактик ($M_r = -16$ зв. вел.) шаг уменьшается до 0.75 зв. вел., что соответствует наблюдаемому сокращению диапазона цветов ($NUV -$

Таблица 1.3: Медианные исправленные цвета (в системе AB) галактик разных морфологических типов и светимостей. Различные цвета (левая колонка) показаны для трех групп галактик (гигантские (1-я группа), галактики промежуточной светимости (2-я группа) и карликовые галактики (3-я группа)) и для 6 хаббловских морфологических типов. Значения стандартных отклонений для каждого медианного цвета представлено в соседних строках таблицы.

	$-24.0 \leq M_r < -22.0$ зв. вел.						$-22.0 \leq M_r < -19.0$ зв. вел.						$-19.0 \leq M_r < -16.0$ зв. вел.					
	Sdm	Sc	Sb	Sa	S0	E	Sdm	Sc	Sb	Sa	S0	E	Sdm	Sc	Sb	Sa	S0	E
$FUV-r$	1.72	2.76	3.46	4.33	5.58	6.86	1.60	2.48	3.22	4.15	5.22	6.72	1.44	2.18	2.87	3.81	4.91	6.78
stddev	0.33	0.33	0.40	0.50	0.78	0.67	0.31	0.32	0.39	0.48	0.71	0.78	0.26	0.31	0.36	0.46	0.75	0.91
$NUV-r$	1.20	2.20	2.89	3.73	4.84	5.64	1.17	2.02	2.69	3.57	4.57	5.44	1.15	1.80	2.41	3.29	4.18	4.98
stddev	0.26	0.20	0.27	0.29	0.30	0.25	0.22	0.24	0.27	0.28	0.29	0.27	0.18	0.23	0.24	0.25	0.26	0.25
$u-r$	0.99	1.48	1.80	2.14	2.44	2.56	0.95	1.34	1.68	2.05	2.32	2.44	0.88	1.19	1.44	1.76	2.02	2.14
stddev	0.15	0.19	0.21	0.21	0.23	0.19	0.19	0.20	0.20	0.21	0.21	0.17	0.26	0.20	0.19	0.22	0.24	0.21
$g-r$	0.26	0.49	0.60	0.70	0.78	0.80	0.24	0.40	0.53	0.65	0.73	0.76	0.22	0.34	0.45	0.57	0.66	0.69
stddev	0.15	0.06	0.05	0.05	0.05	0.03	0.09	0.07	0.06	0.05	0.05	0.04	0.10	0.06	0.06	0.06	0.06	0.04
$g-i$	0.42	0.75	0.92	1.06	1.15	1.17	0.33	0.58	0.81	1.00	1.10	1.12	0.26	0.45	0.64	0.85	0.98	1.02
stddev	0.27	0.11	0.09	0.07	0.07	0.05	0.16	0.12	0.11	0.08	0.08	0.06	0.16	0.11	0.10	0.11	0.10	0.07
$g-z$	0.66	0.97	1.16	1.32	1.42	1.44	0.41	0.72	1.02	1.25	1.37	1.39	0.33	0.55	0.79	1.05	1.18	1.24
stddev	0.32	0.18	0.14	0.11	0.10	0.07	0.21	0.18	0.16	0.12	0.11	0.09	0.21	0.18	0.16	0.16	0.15	0.10
$g-Y$	1.27	1.50	1.70	1.87	1.97	1.98	0.78	1.12	1.50	1.79	1.91	1.92	0.59	0.82	1.12	1.46	1.58	1.68
stddev	0.45	0.19	0.17	0.13	0.12	0.09	0.31	0.27	0.22	0.16	0.14	0.12	0.33	0.28	0.26	0.26	0.23	0.15
$g-J$	1.37	1.56	1.77	1.96	2.05	2.07	0.83	1.15	1.58	1.90	2.01	2.03	0.53	0.77	1.11	1.51	1.66	1.75
stddev	0.46	0.23	0.21	0.17	0.16	0.13	0.38	0.35	0.27	0.19	0.18	0.15	0.49	0.46	0.39	0.36	0.32	0.22
$g-H$	1.63	1.87	2.10	2.30	2.39	2.40	1.05	1.42	1.89	2.22	2.33	2.33	0.77	1.02	1.37	1.80	1.89	1.99
stddev	0.54	0.24	0.21	0.18	0.17	0.14	0.39	0.35	0.27	0.21	0.20	0.16	0.47	0.38	0.34	0.36	0.32	0.20
$g-K$	1.54	1.61	1.83	2.03	2.11	2.11	0.80	1.12	1.60	1.95	2.04	2.03	0.34	0.62	1.00	1.44	1.55	1.63
stddev	0.52	0.25	0.23	0.19	0.18	0.15	0.45	0.40	0.30	0.24	0.23	0.18	0.56	0.49	0.42	0.44	0.36	0.24

r). Мы выбрали 3 диапазона по яркости: $-24.0 \leq M_r < -22.0$ зв. вел., $-22.0 \leq M_r < -19.0$ зв. вел. и $-19.0 \leq M_r < -16.0$ зв. вел., соответствующие гигантским, средним и карликовым галактикам. После чего, мы посчитали для каждой области ожидаемое медианное значение цвета и стандартное отклонение распределения.

Наши результаты показаны в Таблице 1.3. Они обновляют и дополняют широко используемые преобразования цветов Fukugita et al. (1995), используя новый богатейший набор данных; представленные преобразования должным образом исправлены за систематические эффекты с помощью современных методов учета k -поправок. Мы расширили их результаты на $z = 0$ (см. таблицу 3 в Fukugita et al., 1995) до ультрафиолетового и ИК цветов, а также в сторону галактик средних и слабых светимостей. Сравнение наших результатов с Fukugita et al. (1995) показывает хорошую согласованность оптических цветов кроме: а) S0 галактик, которые в нашем случае оказываются систематически краснее и располагаются весьма близко к эллиптическим; б) $u - g$ цвета эллиптических галактик в нашем случае на 0.25 зв. вел. голубее. Мы относим последнее указанное систематическое расхождение на счет наших улучшенных k -поправок для полосы u и в целом более высокого качества фотометрических данных SDSS по сравнению с используемыми в работе Fukugita et al. (1995). Кроме того, более красные оценки цвета линзовидных галактик могут быть связаны с особенностями методики определения синтетических цветов в работе Fukugita et al. (1995), которая недооценивает цвета на 0.1 – 0.15 зв. вел. в 2 из 4 линзовидных галактик (см. таблицу 1 в Fukugita et al., 1995).

1.1.3 Спектральные свойства выборки

1.1.3.1 Звездная кинематика галактик

Сравнивая с оригинальными измерениями звездной кинематики из SDSS, основанными на кросс-корреляции с ограниченным набором модельных спектров, наш подход приносит значительно меньшие несовпадения между модельными и наблюдаемыми спектрами неактивных галактик. Поэтому наши измерения радиальных скоростей и дисперсии скоростей звезд имеют в среднем на 30% меньшие статистические ошибки. Кроме того, существует известное вырождение между металличностью и оценками дисперсии скоростей звезд при использовании методов попиксельной аппроксимации спектров (Chilingarian et al., 2007b), в результате которого недооцененная металличность (т.е. когда спектр галактики с высоким содержанием металлов описывается модельным спектром, который соответствует пониженному содержанию металлов) может быть скомпенсирована уменьшением дисперсии скоростей звезд, которое в меньшей степени приводит к размытию тонких абсорбционных особенностей в спектре галактики. Поэтому используя модельные сетки звездных населений в диапазоне от низких ($[\text{Fe}/\text{H}] = -2.0$ dex) до высоких ($[\text{Fe}/\text{H}] = +0.7$ dex) металличностей, покрывающие весь диапазон возрастов, мы уменьшили систематические ошибки измерений дисперсии скоростей звезд, что особо существенно в богатых металлами массивных эллиптических и линзовидных галактиках. Кроме того, мы точно учли функцию уширения спектральных линий спектрографа SDSS, что позволило нам измерить дисперсию скоростей вплоть до 50 км с^{-1} и таким образом далеко продвинуться в область карликовых галактик (Chilingarian, 2009).

Как уже отмечалось в Fabricant et al. (2013), измерения дисперсии скоростей звезд в каталоге SDSS DR7 систематически недооценены для ярких эллиптических галактик в

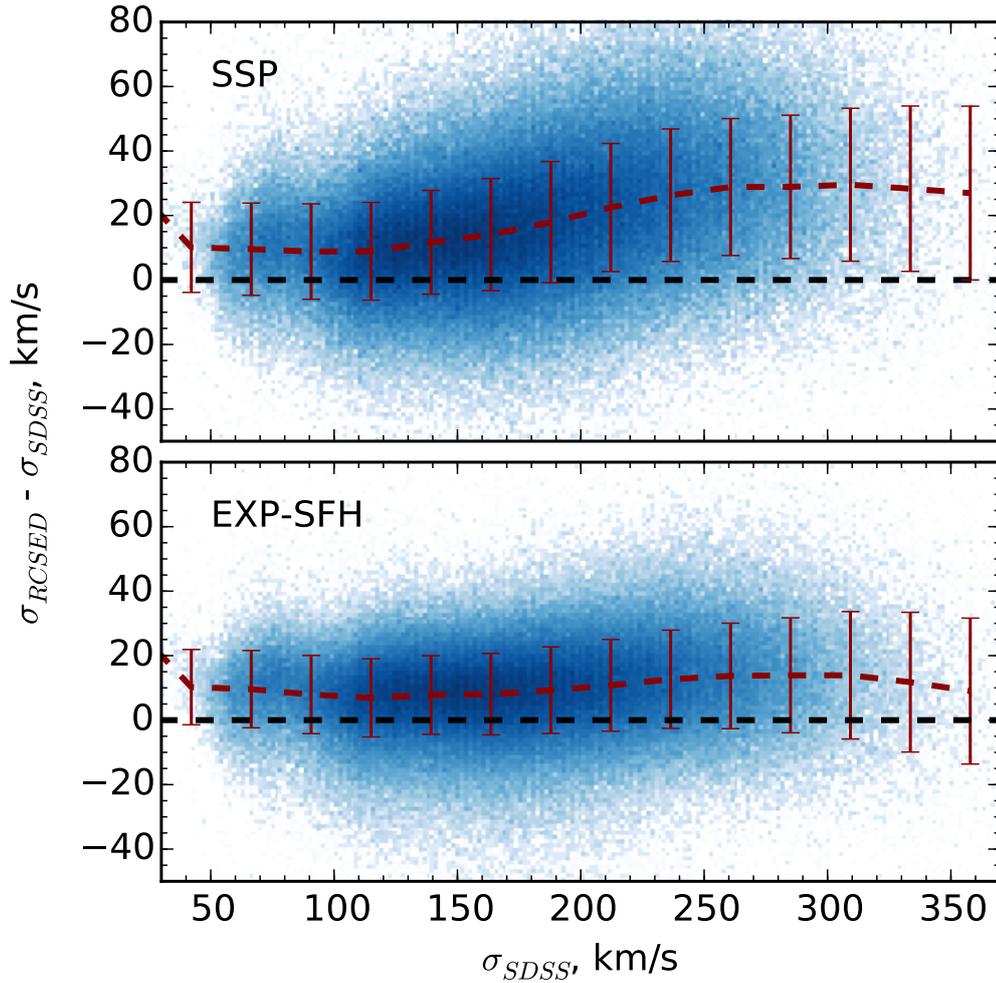


Рис. 1.6: Сравнение значений дисперсии скоростей по каталогу RCSED с оригинальными данными публично доступного каталога SDSS DR7. Верхняя и нижняя панели отображают два набора моделей звездных населений, SSP и exp-SFH, соответственно.

сравнении со значениями полученными методами полной аппроксимации спектров, что скорее всего вызвано эффектами несоответствия моделей и вырождения по металличности, упомянутыми выше. Здесь мы наблюдаем очень похожую тенденцию: наши измерения дисперсии скоростей звезд по SSP-моделям для массивных эллиптических галактик ($\sigma \gtrsim 250 \text{ км с}^{-1}$) завышены на величину до 30 км с^{-1} по сравнению с представленными в каталоге SDSS DR7, и эти различия уменьшаются до $7\text{--}10 \text{ км с}^{-1}$ для галактик низкой светимости ($\sigma \sim 100 \text{ км с}^{-1}$). На Рис. 1.6 (вверху) мы показали сравнение сделанное для 361 421 галактики нашей выборки с ошибками дисперсии скоростей менее 7% (т.е. $\Delta\sigma \leq 7 \text{ км с}^{-1}$ для $\sigma = 100 \text{ км с}^{-1}$). Дисперсия скоростей, оцененная по моделям экспоненциально затухающей истории звездообразования (exp-SFH) немного ближе к значениям SDSS DR7, однако общая тенденция выглядит аналогично (Рис. 1.6, нижняя панель)

На Рис. 1.7 мы представляем зависимость между светимостями галактик и дисперсиями их скоростей, также известную как зависимость Фабера–Джексона (1976), построенную по 52 506 эллиптическим галактикам, относительные ошибки дисперсии скоростей которых не превышают 10%. Морфологическая классификация изображенных галактик

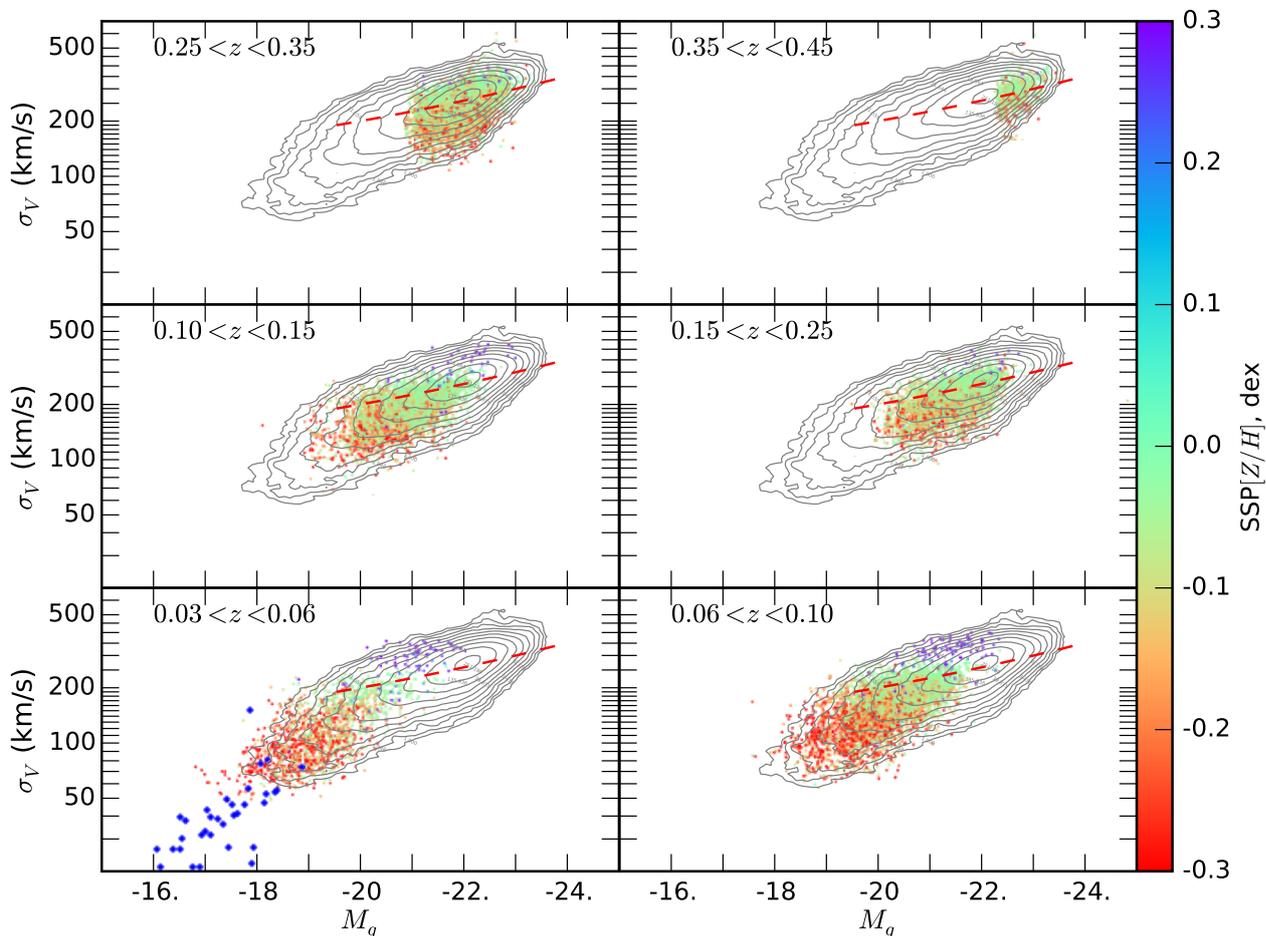


Рис. 1.7: Зависимость Фабера–Джексона для 52 506 галактик, классифицированных по данным проекта Galaxy Zoo как эллиптические. Чтобы исключить отскакивающие точки был применен фильтр, отсекающий галактики с относительной ошибкой более 10% по звездной величине в фильтре g и по дисперсии скоростей звезд, а также добавлено требование $\chi^2 < 0.8$. Контурные соответствуют сглаженному с окном 3×3 пикселя распределению полной выборки галактик для данного диапазона по красным смещениям. Цветом показана звездная металличность $[Z/H]$ в модели SSP. Пунктирные красные линии соответствуют оценкам наиболее правдоподобного наклона $L_g \propto \sigma^{4.00}$ на $z = 0$, рассчитанным по работе [Bernardi et al. \(2003\)](#). Синие точки на малом красном смещении (левая нижняя панель) соответствуют подвыборке карликовых галактик из работы [Chilingarian et al. \(2008\)](#).

была определена волонтерами в рамках проекта Galaxy Zoo. Дисперсии скоростей звезд были скорректированы в соответствии с Cappellari et al. (2006), используя оценки эффективного радиуса Simard et al. (2011). Для включения галактики в рассмотрение мы, руководствуясь критериями из работы Saulder et al. (2013), требовали не менее 10 оценок морфологической классификации пользователями Galaxy Zoo, из которых не менее 70% соответствуют эллиптической галактике. На шести частях рисунка цветными точками представлены результаты для шести разных интервалов красных смещений, а контурами отмечены полные распределения для всех красных смещений. На нижней левой панели с самым низким красным смещением, большими синими точками показаны галактики в скоплении Abell 496 ($z = 0.033$), полученные из анализа спектров среднего разрешения ($R=6300$) со спектрографа FLAMES-Giraffe на 8-м Very Large Telescope (VLT) Европейской Южной Обсерватории (ESO) (Chilingarian et al., 2008). Эта выборка включается в себя в основном карликовые галактики раннего типа, и она явно продолжает последовательность галактик SDSS на малых светимостях, что демонстрирует отсутствие систематических ошибок в определении дисперсии скоростей звезд для галактик малой светимости, связанных, например, с неточностью функции уширения спектральных линий (инструментального контура). Красная пунктирная линия показывает зависимость Фабера–Джексона для гигантских эллиптических галактик $L_g \propto \sigma^{4.00}$ на $z = 0$, описанную в статье Bernardi et al. (2003). Мы видим, что наклон изменяется до $L_g \propto \sigma^{2.00}$ на слабых светимостях $M_g > -19.5$ зв. вел. подобно тому, что было продемонстрировано для выборки карликовых галактик в скоплении Coma Matković & Guzmán (2005).

Из-за корреляции светимости галактик с дисперсией скоростей звезд и ограничения предельной звездной величины для галактик выборки, на больших красных смещениях галактики попадают в область большой дисперсии скоростей звезд. Наш каталог покрывает карликовые галактики ($\sigma < 100$ км с⁻¹) на малых красных смещениях ($0.007 < z < 0.06$), которые входят в состав сотен массивных скоплений и групп галактик.

Дисперсии скоростей звезд из каталога RCSED были использованы еще до публичного релиза каталога в статье Saulder et al. (2013) для калибровки Фундаментальной Плоскости (Fundamental Plane) (Djorgovski & Davis, 1987). Мы отсылаем читателя к этой работе для более детального обсуждения Фундаментальной Плоскости для эллиптических галактик из SDSS.

1.1.3.2 Свойства звездных населений из анализа абсорбционных спектров

В наш каталог мы включили параметры звездных населений, полученные аппроксимацией спектров галактик с помощью двух модельных сеток звездных населений, вычисленных с использованием эволюционного кода PEGASE.HR: а) SSP-модели на основе звездной библиотеки среднего разрешения MILES, характеризующиеся возрастными (t) и металличностями ($[Fe/H]$); и б) модели с экспоненциально затухающим звездообразованием (exp-SFH) на основе библиотеки звездных спектров высокого разрешения ELODIE-3.1, характеризующиеся экспоненциальной шкалой затухания звездообразования (τ) и металличностями ($[Fe/H]$). На Рис. 1.8 показано распределение галактик в обоих пространствах параметров.

Можно отчетливо видеть “пятнистую” структуру параметров SSP-моделей и отсутствие такой структуры для exp-SFH моделей. Мы также провели аналогичные тесты для оригинальных моделей звездных населений MILES Vazdekis et al. (2010) и моделей Bruzual & Charlot (2003) для подвыборки спектров SDSS DR7. Подробное описание и детальное

обсуждение выявленной структуры мы выполним в предстоящей работе (Katkov et al., в работе), здесь же мы приводим краткое резюме и выводы нашего исследования.

Наблюдаемая пятнистая структура демонстрирует артефакты, вызванные не процедурой аппроксимации звездных населений NBURSTS, а неправильной реализацией алгоритма интерполяции в коде расчета звездных населений, скорее всего, на стадии интерполяции звездной библиотеки, распространяющейся на модели звездных населений. Код NBURSTS использует нелинейный метод минимизации, который требует непрерывных вторых частных производных по всем параметрам. Разрывы минимизируемого функционала, наличие которых определяется используемой сеткой звездных населений, вынудят решение тяготеть к какой-либо области пространства параметров или наоборот, отдалиться от нее.

Наш вывод подтверждается следующими наблюдениями: а) морфология пятнистой структуры остается похожей и при использовании двух различных наборов моделей SSP, вычисленных с тем же эволюционным кодом PEGASE.HR, но с различными звездными библиотеками, MILES и ELODIE; б) переключение на оригинальные модели MILES (Vazdekis et al., 2010), где процедура интерполяции значительно проще, чем в PEGASE.HR (линейная интерполяция между 5 ближайшими соседями), полностью изменяет структуру и усиливает артефакты; в) использование моделей с экспоненциально затухающей историей звездообразования, которые построены интегрированием многочисленных SSP компонент с весами, удаляет большую часть структуры на $\tau \gtrsim 1.0$ млрд. лет, но структура по-прежнему имеет место при $\tau < 1.0$ млрд. лет, где количество интегрируемых SSP мало; г) сглаживание сетки PEGASE.HR MILES на моделях SSP по возрасту, с использованием сглаживающих b -сплайнов, удаляет большую часть “пятнистого” узора.

Заметим также, что расширение рабочего спектрального диапазона в сторону более коротких длин волн ($< 4500 \text{ \AA}$) и увеличение степени мультипликативного полинома усиливает структуру, оставляя положения пятен в структуре практически теми же. Поэтому мы выбрали полиномиальный континуум 5-го порядка и ограничили спектральный диапазон $\lambda > 4500 \text{ \AA}$ для определения SSP-параметров звездных населений, представленных в каталоге.

На верхней панели Рис. 1.9 показано сравнение возрастов SSP моделей и экспоненциальных шкал τ . Несмотря на наличие артефактов в возрастах, которые простираются горизонтальными полосами на этом участке, есть полное совпадение между t и τ в широком диапазоне возрастов. Малые временные шкалы τ соответствуют старым звездным населением, в то время как $\tau = 20$ млрд. лет эквивалентно $t \approx 1.8$ млрд. лет. Зависимость “насыщается” для молодых звездных населений, потому они не могут быть писаны моделью экспоненциально затухающего звездообразования, которое началось на больших красных смещениях. Чтобы корректно описать молодое звездное население необходимо либо более позднее начало звездообразования, либо несколько вспышек. В работе Chilingarian & Zolotukhin (2012) мы показали, что модели exp-SFH гораздо лучше описывают наблюдаемые широкополосные оптические и ультрафиолетовые цвета, чем модели SSP. В нашей выборке около 16% галактик ($\sim 131\,500$) имеют заметно молодые звездные населения, чтобы хорошо описываться моделями экспоненциально затухающего звездообразования.

На нижней панели Рис. 1.9 показано сравнение звездных металличностей для двух наборов моделей. Видно превосходное соответствие с небольшим систематическими различиями между $-0.6 < [\text{Fe}/\text{H}] < -0.2$ dex, которые мы относим к вырождению между измерениями металличности и дисперсии скоростей звезд для данных умеренного сиг-

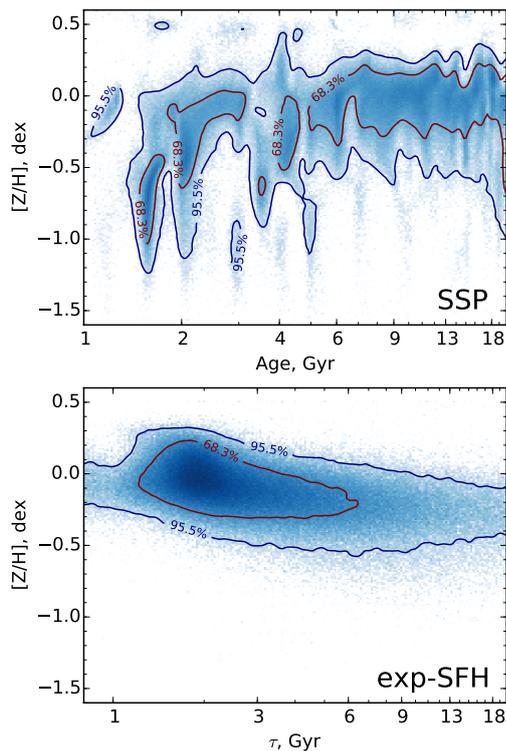


Рис. 1.8: Распределение галактик в пространстве возраст–металличность, полученное при использовании SSP (верхняя панель) и exp-SFH моделей (нижняя панель).

нал/шум.

В наших измерениях мы отчетливо видим заметное вырождение между оценками металличности и дисперсии скоростей звезд, которые были указаны в [Chilingarian et al. \(2007b\)](#). Чтобы протестировать этот эффект, безотносительно других эффектов, например, связанных с использованием различных историй звездообразования, мы промоделировали подвыборку $\sim 420\,000$ спектров с помощью моделей PEGASE.HR-SSP в диапазоне длин волн 3910–6790 Å и сравнили получившиеся металличности и дисперсии скоростей звезд с результатами, полученными для моделей MILES-PEGASE для того же набора спектров.

На Рис. 1.10 показано соотношение между различиями в оценках дисперсии скоростей и SSP-металличности, полученных с использованием двух сеток моделей звездных населений при различных значениях отношения сигнал/шум. Отчетливо видно вырождение, проявляющееся в виде удлинённой формы облака, которое уменьшается с увеличением отношения сигнал/шум вплоть до $S/N = 30$. При $S/N > 30$ улучшение становится незначительным. Этот результат позволяет предположить, что опубликованные значения дисперсии скоростей, полученные аппроксимацией спектра среднего разрешения, являются предметом серьезных систематических ошибок, достигающих 15% от измеренных значений.

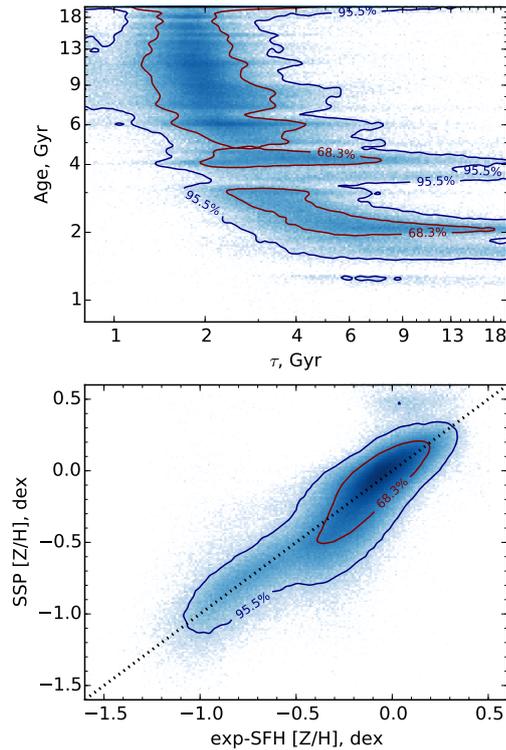


Рис. 1.9: Сравнение SSP-возрастов с временными шкалами τ для моделей экспоненциально затухающего звездообразования (вверху) и металличностей (внизу).

1.1.3.3 Свойства эмиссионных линий

1.1.3.3.1 Сравнение потоков в линиях с каталогом MPA–JHU и между двумя методами

Мы сравнили наши измерения потоков в эмиссионных линиях, полученные гауссовой аппроксимацией, с результатами из каталога MPA–JHU (Brinchmann et al., 2004; Tremonti et al., 2004) для подвыборки галактик. Потоки в линиях в обоих проектах были рассчитаны схожим образом, главное отличие заключается в вычитании звездного абсорбционного континуума и методах исправления поглощения в Галактике, поэтому мы ожидаем хорошее согласие между ними в случае сильных эмиссионных линий. Мы сравнили потоки в эмиссионных линиях [OII] (3727 Å), [OIII] (5007 Å), H α и [NII] (6584 Å) для подвыборки галактик, в которых они были обнаружены на уровне, превышающем 10σ (т.е. Flux/ σ (Flux) > 10). Результаты представлены на Рис. 1.11. Видно великолепное согласие с систематическими различиями менее 1%, стандартное отклонение невязок для потоков ярких линий H α около 2%. Для слабых линий (10σ), систематические различия остаются в пределах 2%, а стандартное отклонение возрастает до 3%. Таким образом, мы приходим к выводу, что наш код аппроксимации эмиссионных линий работает, как ожидалось и не вносит никаких существенных систематических ошибок в значения оценок потоков эмиссионных линий.

По сравнению с H α , линия H β гораздо более чувствительна к возрасту вычитаемого звездного населения. В Приложении работы Chilingarian et al. (2016) приводится обсуждение систематических ошибок потоков в линии H β как функцию рассогласования возраста.

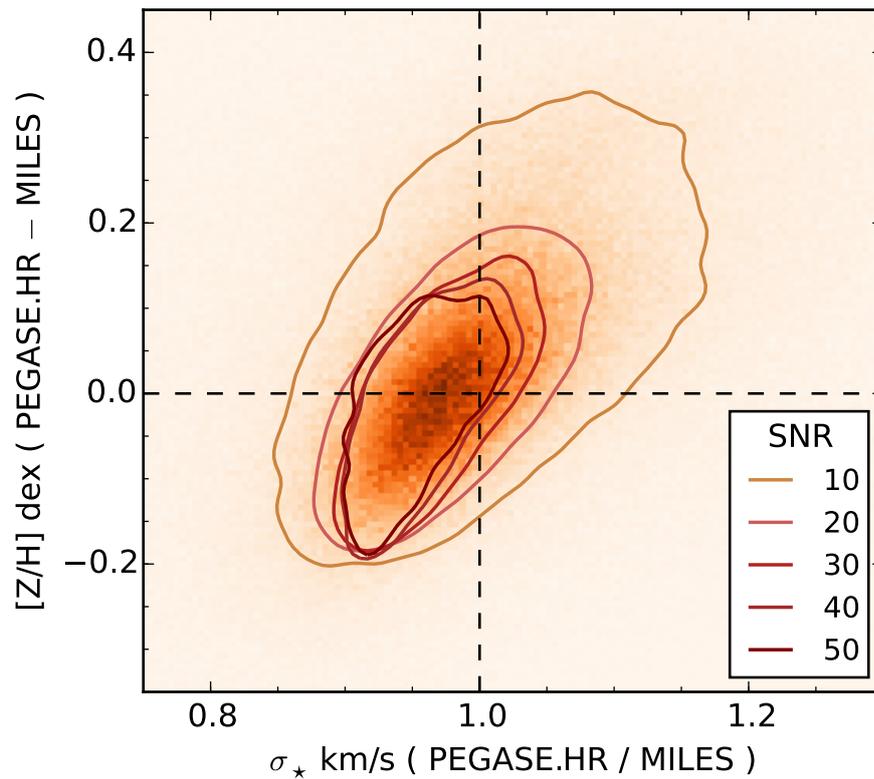


Рис. 1.10: Вырождение между оценками металличности и дисперсии скоростей звезд показано как зависимость разницы SSP оценок металличности звезд и отношения оценок дисперсии скоростей звезд, полученные с применением SSP моделей звездных населений PEGASE.HR и MILES-PEGASE. Распределение построено по 420 000 объектам. 1σ контуры показывают область, содержащую 68% используемой подвыборки галактик, обладающие отношением S/N в пределах $\pm 20\%$ от отображаемого значения. Число галактик для каждого контура варьируется от ~ 1800 (S/N=50) до $\sim 111\,000$ (S/N=10).

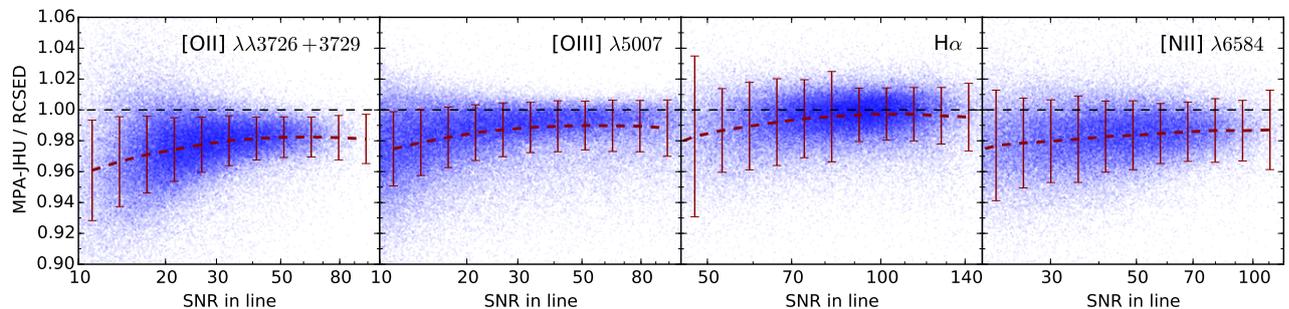


Рис. 1.11: Сравнения потоков в наиболее ярких эмиссионных линиях из RCSED с каталогом MPA-JHU. Расположение медианных значений и стандартных отклонений показаны коричневыми точками с ошибками.

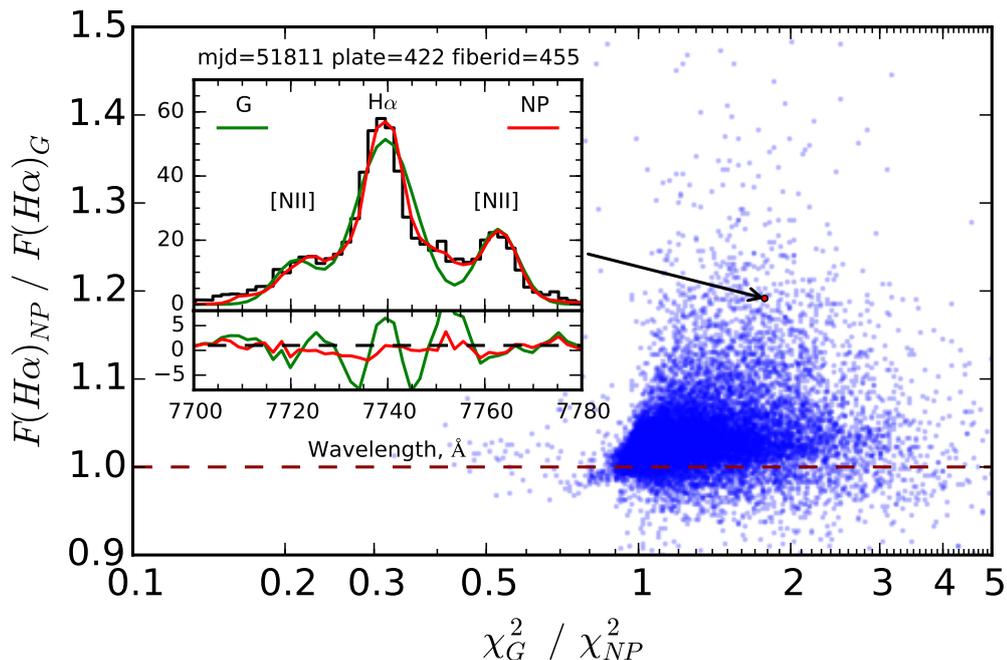


Рис. 1.12: Сравнение потоков в линии $H\alpha$, полученных параметрической (гауссовой) и непараметрической аппроксимацией профиля эмиссионной линии, как функции от χ^2 . На вставке показан пример декомпозиции профиля $H\alpha$ показан для объекта с сильно отличающимися оценками потока.

Если возраст звездного населения был определен неверно, то в измерениях слабых $H\beta$ линий доминируют систематические ошибки, которые делает линию $H\beta$ бесполезной для использования ее в различных диагностических метриках.

Основное отличие наших результатов по эмиссионным линиям с опубликованными ранее – это использование непараметрического метода аппроксимации профилей эмиссионных линий. Для галактик с признаками активного ядра потоки балмеровских линий, полученные непараметрической аппроксимацией профиля, значительно превышают значения полученные гауссовым приближением. На Рис. 1.12 показаны отношения потоков в линии $H\alpha$, полученных двумя подходами. Вставка содержит профиль $H\alpha$ сейфертовской галактики, у которой видна сильная разница в аппроксимации профиля гауссовым (зеленая линия) и непараметрическим профилем (красная линия). Видно, что непараметрическая оценка потока в $H\alpha$ на 20% больше, чем оценка гауссовым профилем. Более подробное описание непараметрического подхода к аппроксимации эмиссионных линий приводится в статьях (Chilingarian et al., 2016) и Katkov et al. (в работе).

1.1.3.3.2 Диагностические ВРТ-диаграммы и металличности ионизованного газа

На Рис. 1.13 представлено три вида ВРТ-диаграмм (Baldwin et al., 1981), которые используют разные наборы эмиссионных линий. Цвет точек показывает эквивалентные ширины (EW) линии $H\alpha$. В работе Cid Fernandes et al. (2010) было предложено использовать EW линии $H\alpha$ для отделения сейфертовских галактик и галактик с ядерной активностью типа

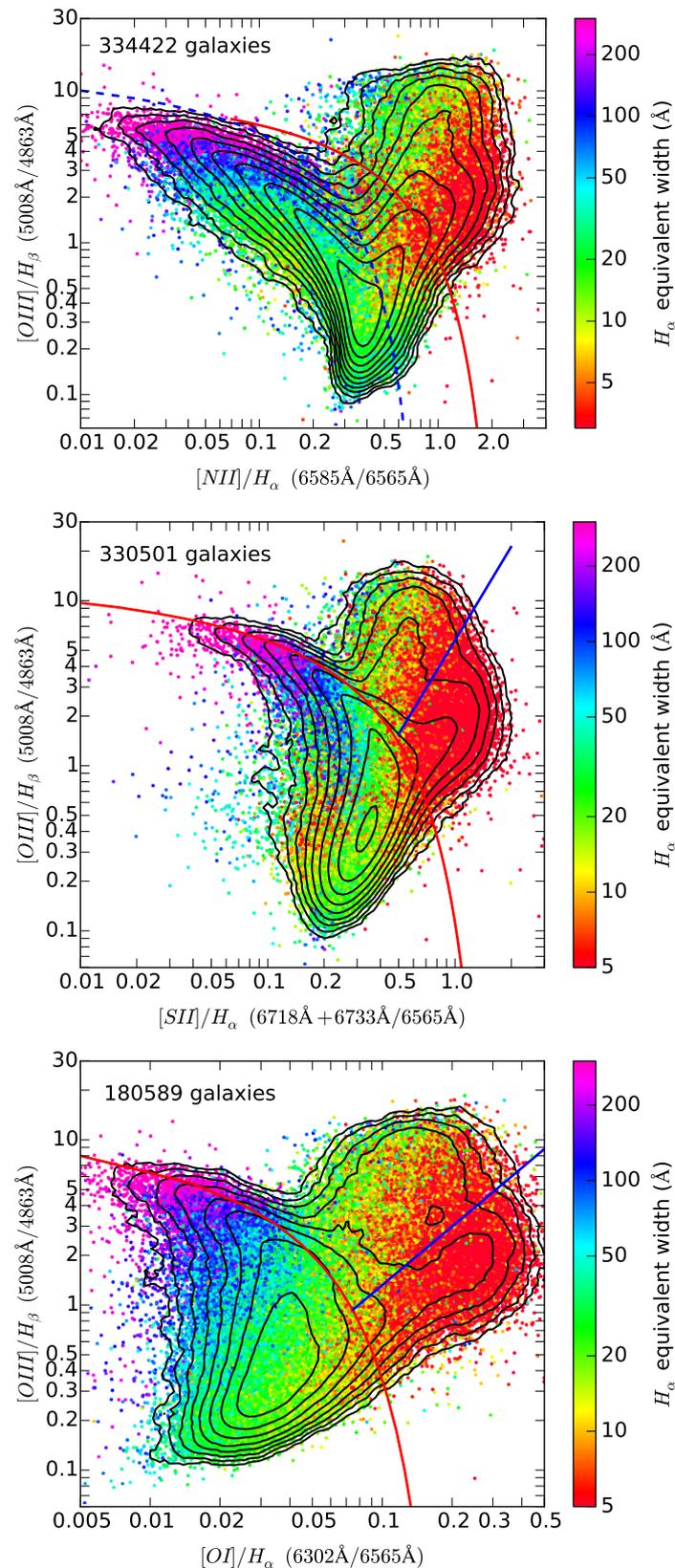


Рис. 1.13: Диагностические BPT-диаграммы (Baldwin et al., 1981). Цвет распределений отображает значение эквивалентной ширины линии H α . На диаграммах показаны только те галактики, для которых все необходимые линии имеют $S/N > 3$. Контурными показаны линии одинаковой плотности, вычисленные по сглаженным в квадрате 4×4 пикселя областям. Количество галактик, входящих в выборку, указано на каждой диаграмме в левом верхнем углу. Сплошными и пунктирными линиями показаны границы областей доминирования фотоионизации излучением молодых звезд, нетепловых механизмы возбуждения газа (AGN/LINER, ударные волны) в соответствии с работой Kewley et al. (2006).

LINER вместо традиционно используемого отношения $[OIII]/H\beta$, так как линия $H\beta$ часто слишком слаба, чтобы быть обнаруженной и измеренной. На двух нижних диаграммах отчетливо видно бимодальное распределение галактик без звездообразования, что соответствует сейфертовским галактикам (облако, тянущееся вверх) и область (облако, спускающееся вниз), где доминирующим механизмом возбуждения могут быть LINER активность, ударные волны или излучение звезд сошедших с асимптотической ветви гигантов (post-AGB звезды). Верхняя диаграмма показывает оригинальную BPT-зависимость. Область между сплошной красной и синей пунктирной линиями определяет “переходные” галактики (Kewley et al., 2006), которые мы включили в выборку для расчета металличностей в дополнение к галактикам со звездообразованием, расположенным под синей пунктирной линией.

Как мы уже написали выше, RCSED включает в себя значения металличности газа, рассчитанные с помощью байесовского метода, реализованного в программе IZI, на модельных сетках Dopita et al. (2013) с использованием всех доступных эмиссионных линий в спектре; также для расчетов был использован новый метод Dopita et al. (2016), опирающийся на $[N/O]$ калибровки и использует всего 5 эмиссионных линий.

Kewley & Ellison (2008) показали, что в зависимости от калибровок эмиссионных линий оценки металличности газа могут отличаться на 0.7 dex (в 5 раз). В настоящее время в астрономическом сообществе не существует единого мнения о том, какие калибровки дают наиболее надежные оценки металличности ионизованного газа для прямого (Andrews & Martini, 2013) и для косвенного (López-Sánchez et al., 2012) методов. Металличности газа и звезд также могут сильно отличаться (Yates et al., 2012). Заметим, что все калибровки для расчета металличности газа по эмиссионным линиям дают оценки, которые доходят до более низких металличностей $[O/H]$, по сравнению со звездными металличностями. Все калибровочные соотношения для металличностей газа имеют насыщение на больших значениях металличности, которое происходит на разном уровне (см. пример на рис. 10 в статье Andrews & Martini, 2013). Наибольший диапазон металличностей ионизованного газа получается в результате применения калибровок, используемых Tremonti et al. (2004) и представленных в каталоге MPA-JHU.

На Рис. 1.14 приведено сравнение Dopita et al. (2016) калибровки металличностей MPA-JHU (синяя заштрихованная область) для 231 107 галактик с отношением сигнал/шум в линиях $H\alpha$, $[N II]$, $[O II]$, и $[O III]$ больше 10. Видно хорошее согласование при $12 + [O/H] < 9$ dex со стандартным отклонением 0.08 dex. А на больших металличностях MPA-JHU немного занижаются по сравнению с Dopita et al. (2016).

Мы применили программу IZI для определения металличностей газа для небольшой подвыборки 20 000 случайно выбранных галактик со звездообразованием и высоким отношением сигнал/шум в эмиссионных линиях ($S/N > 10$). Мы использовали все доступные в IZI сетки моделей фотоионизации и сравнили получившиеся металличности с результатами применения калибровочных соотношений Dopita et al. (2016) для тех же галактик. Удовлетворительное согласие показала только одна модельная сетка из работы Dopita et al. (2013). Как и ожидалось, она также обеспечивает удовлетворительное согласие с каталогом MPA-JHU (см. Рис. 1.14, оранжевые затененные области) со стандартным отклонением 0.10 dex.

На Рис. 1.15 показано соотношение светимость–металличность (левая часть) и сравнение SSP-металличности звездного населения с металличностями газа (правая часть),

посчитанные с помощью IZI по модели [Dopita et al. \(2013\)](#) (оранжевые контуры) и калибровки [Dopita et al. \(2016\)](#) (синие точки). Соотношение масса–металличность определено корректно и хорошо видно, что модельная сетка [Dopita et al. \(2013\)](#), используемая в IZI, дает более плоскую форму, чем более современное калибровочное соотношение ([Dopita et al., 2016](#)).

Сравнение металличностей газа и звезд показывает существенное смещение в диапазоне от ≈ 0.3 dex на солнечных металличностях до 0.8 dex на нижнем конце ($[\text{Fe}/\text{H}]_{\text{star}} = -1.1$ dex). Принимая во внимание, что звездные металличности и металличности газа могут иметь разные нуль-пункты, они непосредственно могут не совпадать друг с другом. Однако наблюдаемое распределение — именно то, что и ожидалось увидеть за счет самообогащения звездных населений, происходящего в галактиках с продолжительным звездообразованием. За время жизни звезды вырабатывают тяжелые элементы, которые затем выбрасываются в межзвездное пространство и перерабатываются последующими поколениями звезд, следовательно, в них увеличивается содержание металлов (см. например [Matteucci, 1994](#)). Таким образом, молодые поколения звезд обогащаются тяжелыми металлами. Металличность звездного населения в SSP-модели отражает усредненное (с весами, пропорциональными отношению M/L звездного населения) значение металличности за всю историю звездообразования галактики. В то же время, металличность газа отражает текущую картину содержания химических элементов в межзвездной среде, обогащенной металлами, поэтому мы ожидаем увидеть смещение по металличностям. При постоянной скорости обогащения металлами в пересчете на одну солнечную массу, на низких металличностях различие будет больше, потому что шкала металличностей логарифмическая, поэтому звездные металличности должны охватывать больший диапазон значений по сравнению с металличностями газа, а наклон зависимости масса–металличность для газа будет меньше, чем для звезд.

1.1.4 Доступ к каталогу: веб-сайт и интерфейсы Виртуальной Обсерватории

Эффективный, удобный и интуитивно понятный интерфейс доступа к базе данных — это немаловажная часть такого комплексного проекта как RCSED. Поэтому мы решили сделать интерфейс для диалогового и программного доступа к данным.

RCSED включает в себя различные типы данных (спектры и таблицы параметров), внутреннее устройство которых схематично показано на Рис. 1.16. С помощью различных интерфейсов доступ к данным организован максимально просто и удобно. Наиболее естественный путь доступа к каталогу возможен через использование веб-приложения на сайте <http://rcsed.sai.msu.ru/>. Он представляет собой поисковый интерфейс в стиле GOOGLE, где можно запросить каталог по идентификатору объекта, его координатам или свойствам. В запросе возможно использование фильтров, с помощью которых максимально просто, например, выбрать все галактики с красным смещением менее 0.1 и цветом $g - r > 1.5$. Каждый объект выборки имеет собственную веб-страницу со всеми свойствами: распределение энергии в спектре во всех доступных для данного объекта фотометрических полосах, оптический спектр SDSS. Кроме того, на странице объекта приводится цветное изображение объекта в различных диапазонах спектра в соответствии с доступными данными обзоров GALEX, SDSS и UKIDSS. Сайт каталога RCSED продолжает серию методических работ автора по созданию научных баз данных в сети Интернет, начавшуюся с Каталога рассеянных скоплений ГАИШ МГУ <http://ocl.sai.msu.ru>

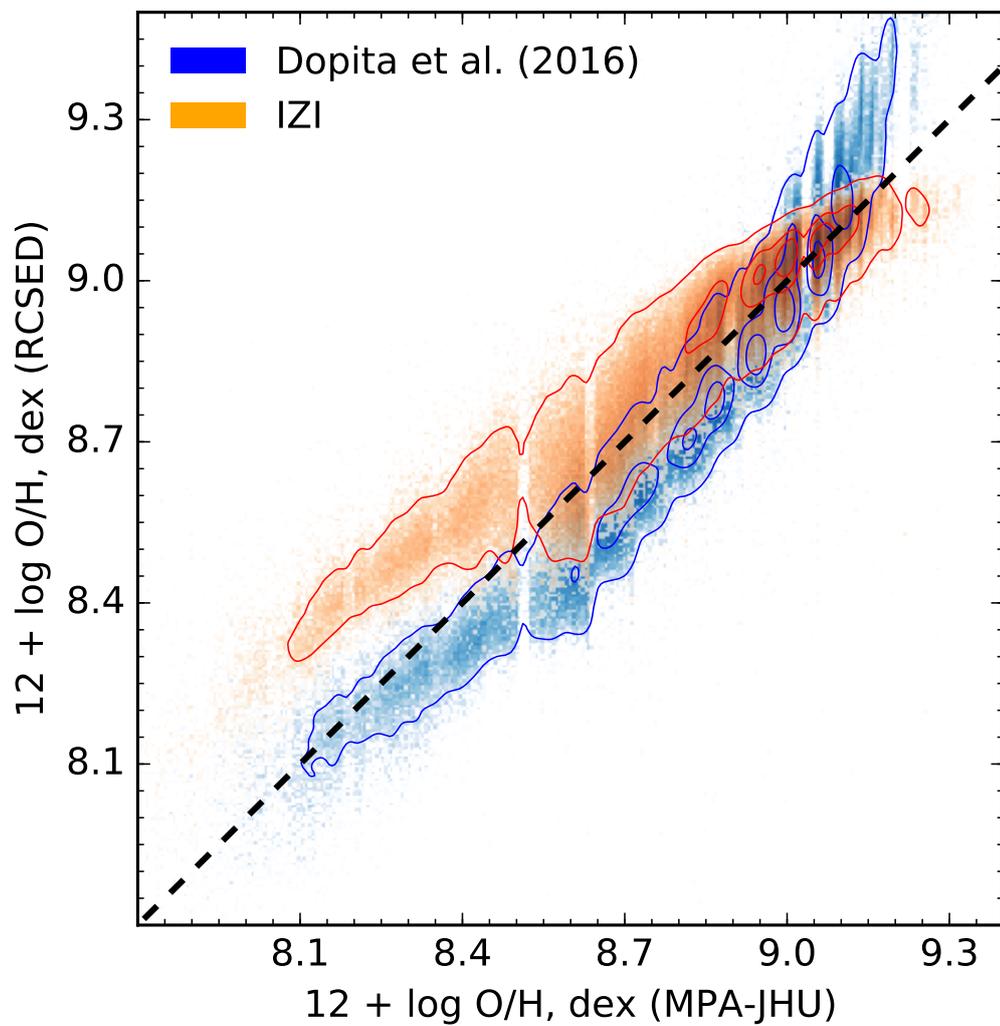


Рис. 1.14: Сравнение газовых металличностей из каталога MPA-JHU (горизонтальная ось) с нашими результатами (вертикальная ось). Значения, полученные байесовским методом IZI, показаны коричневым цветом, а значения по калибровкам Dopita et al. (2016) показаны голубым цветом.

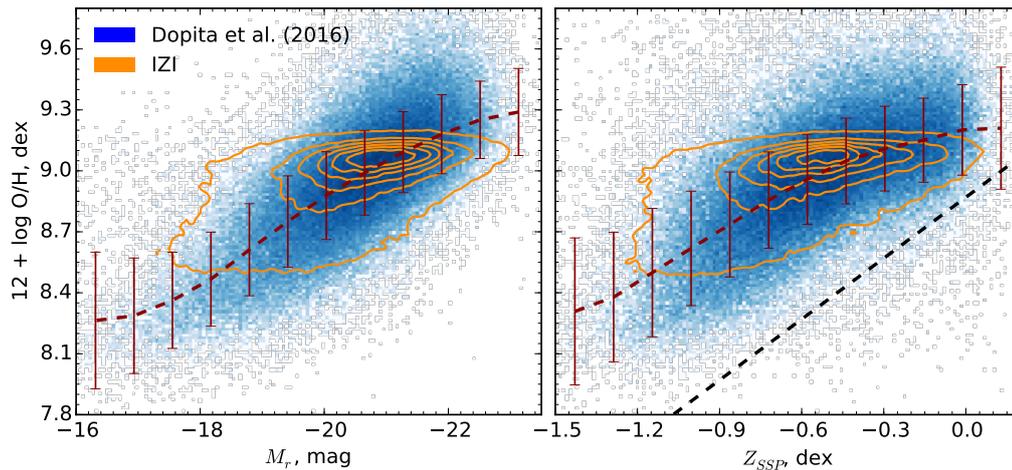


Рис. 1.15: Соотношение светимость–металличность газа (слева) и соотношение между металличностью ионизованного газа и SSP металличностью звездного населения галактик; (справа). Синие точки и оранжевые контуры плотности показывают металличности, рассчитанные с помощью калибровки [Dopita et al. \(2016\)](#) и программой IZI соответственно. Медианные значения и стандартные отклонения для [Dopita et al. \(2016\)](#) показаны коричневыми точками с ошибками.

([Glushkova et al., 2010](#)), за которым последовала чрезвычайно популярная Энциклопедия экзопланет <http://exoplanet.eu> ([Schneider et al., 2011](#)) и сайт каталога *XMM-Newton* <http://xmm-catalog.irap.omp.eu> (см. Раздел 1.2.4 ниже).

В дополнение к обычному веб-приложению и доступу через веб-браузер для ручного анализа небольших выборок объектов данные каталога RCSED представлены для программного доступа через интерфейсы GAVO DaCHS ¹⁰ (см. Рис. 1.16), совместимые с инфраструктурой Виртуальной Обсерватории.

Спектры SDSS и параметры SSP-моделей доступны в виде FITS-файлов и доступны для скачивания по прямым уникальным гиперссылкам. Можно найти ссылку на файл со спектром для любого конкретного объекта на его странице или сделать через сервис IVOA Simple Spectral Access Protocol (SSAP), используя координаты объекта. Сервис SSAP возвращает список гиперссылок на спектры и это удобно для программного доступа или для использования через программы–клиенты Виртуальной Обсерватории, такие как TOPCAT ¹¹ ([Taylor, 2005](#)), SPLAT-VO ¹² или VO-Spec ¹³, которые могут напрямую загружать спектральные данные для дальнейшего анализа результатов запросов веб-сервисом SSAP.

Для максимальной гибкости работы с табличными данными нашего каталога, мы предоставили доступ к данным через протокол Table Access Protocol (TAP). IVOA TAP — это интерфейс доступа к данным, позволяющий пользователю обращаться ко всей схеме базы данных (см. Рис. 1.17), используя мощный SQL-подобный язык запросов ADQL. Этот интерфейс можно рассматривать как свободно распространяемый продукт, эквивалентный сервису SDSS CasJobs. Веб-сервис TAP может быть использован для программируемого доступа к данным каталога или для доступа с помощью пользовательских гра-

¹⁰<http://soft.g-vo.org/dachs>

¹¹<http://www.star.bris.ac.uk/~mbt/topcat/>

¹²<http://www.g-vo.org/pmwiki/About/SPLAT>

¹³<http://www.sciops.esa.int/index.php?project=SAT&page=vospec>

фических приложений Виртуальной обсерватории. Например, приложение TOPCAT имеет удобное диалоговое окно для TAP-запросов со встроенным справочником, примерами запросов, подсвечивающимся синтаксисом и опцией отображения схемы базы данных. Мы рекомендуем использовать TAP-сервис доступа к данным нашего каталога RCSED через приложение TOPCAT. Кроме того, мы обращаем внимание на то, что наш TAP-сервис имеет возможность загрузки пользовательских таблиц (опция TAP upload), таким образом пользователь может загрузить свою собственную таблицу для последующего выполнения ADQL запроса, в котором можно указывать любые данные из загруженной таблицы. Такой способ доступа особенно удобен для идентификации пользовательской выборки с объектами каталога RCSED без необходимости загрузки всего каталога.

Ниже продемонстрировано несколько примеров запросов, которые помогут начать использовать базу данных RCSED. Больше вариантов запросов и научный справочник находятся на сайте проекта <http://rcsed.sai.msu.ru>. Наш TAP веб-сервис может быть использован для объединения таблиц из базы данных, схема которой представлена на Рис. 1.17. Например, можно легко извлечь таблицу с морфологической классификацией Galaxy Zoo, результатами фотометрической балдж+диск декомпозиции и основными параметрами RCSED для любой интересующей галактики из каталога RCSED. Пример такого запроса для получения всех данных для конкретного объекта:

```
SELECT
  r.*, g.*, s2.*
FROM
  specphot.rcsed AS r
  JOIN specphot.galaxyzoo AS g
    ON r.objid = g.objid
  JOIN specphot.simard_table2 AS s2
    ON r.objid = s2.objid
WHERE
  r.objid = 587731891649052703
```

Заметим, что приставка `specphot` к имени таблицы соответствует названию схемы в базе данных RCSED, где хранятся таблицы. Запрос на извлечение всех данных по галактике из RCSED, классифицированных как эллиптические в проекте Galaxy Zoo:

```
SELECT
  r.*
FROM
  specphot.rcsed AS r
  JOIN specphot.galaxyzoo AS g
    ON r.objid = g.objid
WHERE
  g.elliptical = 1
```

Запрос 10 000 объектов с измерениями потоков в соответствующих эмиссионных линиях с $S/N > 10$ для построения ВРТ-диаграммы выглядит так:

```
SELECT
```

```

TOP 10000
f6550_nii_flx / f6565_h_alpha_flx AS BPT_x,
f5008_oiii_flx / f4863_h_beta_flx AS BPT_y
FROM
  specphot.rcsed_lines_gauss
WHERE
  f6565_h_alpha_flx / f6565_h_alpha_flx_err > 10
  AND f5008_oiii_flx / f5008_oiii_flx_err > 10
  AND f4863_h_beta_flx / f4863_h_beta_flx_err > 10
  AND f6550_nii_flx / f6550_nii_flx_err > 10

```

Наконец, все таблицы каталога (см. Рис. 1.17) доступны для скачивания на сайте проекта как бинарные FITS-таблицы для последующего использования без соединения с Интернетом.

1.1.5 Подготовка каталога: SQL-запрос

Для создания родительской выборки мы использовали следующий запрос к данным SDSS DR7 через веб-сервис SDSS CasJobs (см. подробнее в Разделе 1.1.1.1):

```

SELECT
  p.objID, p.ra, p.dec,

  p.modelMag_u, p.modelMagErr_u, p.modelMag_g, p.modelMagErr_g,
  p.modelMag_r, p.modelMagErr_r, p.modelMag_i, p.modelMagErr_i,
  p.modelMag_z, p.modelMagErr_z,

  petroMag_u, petroMagErr_u, petroMag_g, petroMagErr_g,
  petroMag_r, petroMagErr_r, petroMag_i, petroMagErr_i,
  petroMag_z, petroMagErr_z,

  p.fiberMag_u, p.fiberMagErr_u, p.fiberMag_g, p.fiberMagErr_g,
  p.fiberMag_r, p.fiberMagErr_r, p.fiberMag_i, p.fiberMagErr_i,
  p.fiberMag_z, p.fiberMagErr_z,

  p.petroR50_u, p.petroR50Err_u, p.petroR50_g, p.petroR50Err_g,
  p.petroR50_r, p.petroR50Err_r, p.petroR50_i, p.petroR50Err_i,
  p.petroR50_z, p.petroR50Err_z,

  p.extinction_u, p.extinction_g, p.extinction_r, p.extinction_i,
  p.extinction_z,

  s.specObjID, s.mjd, s.plate, s.fiberID,
  s.z, s.zerr, s.zconf, s.objType, s.sn_0, s.sn_1, s.sn_2,
  (SELECT stripe FROM dbo.fCoordsFromEq(p.ra,p.dec)) AS stripe,
  s.specClass

```

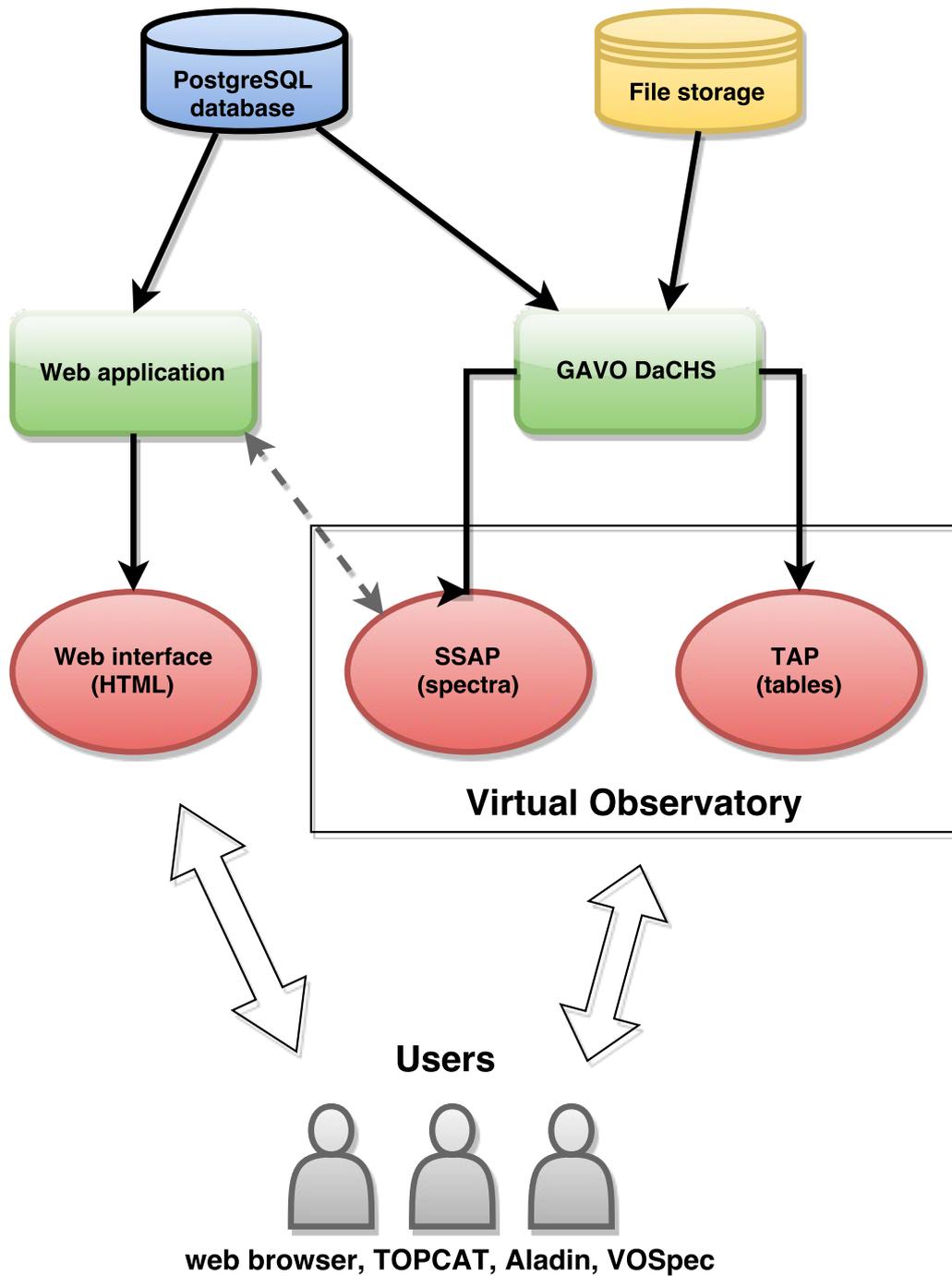


Рис. 1.16: Блок-схема организации доступа к данным каталога RCSED. Данные хранятся собственно в базе данных (таблицы каталога и исходные спектры) и на дисковом хранилище (FITS-файлы с наблюдаемыми спектрами и моделями континуума). Они доступны из приложений (пользовательских веб-приложений и веб-приложения центра данных GAVO DaCHS), которые в свою очередь реализуют несколько общедоступных интерфейсов, удобных для запросов и извлечения данных с помощью множества пользовательских программ, включая ВО-совместимые.

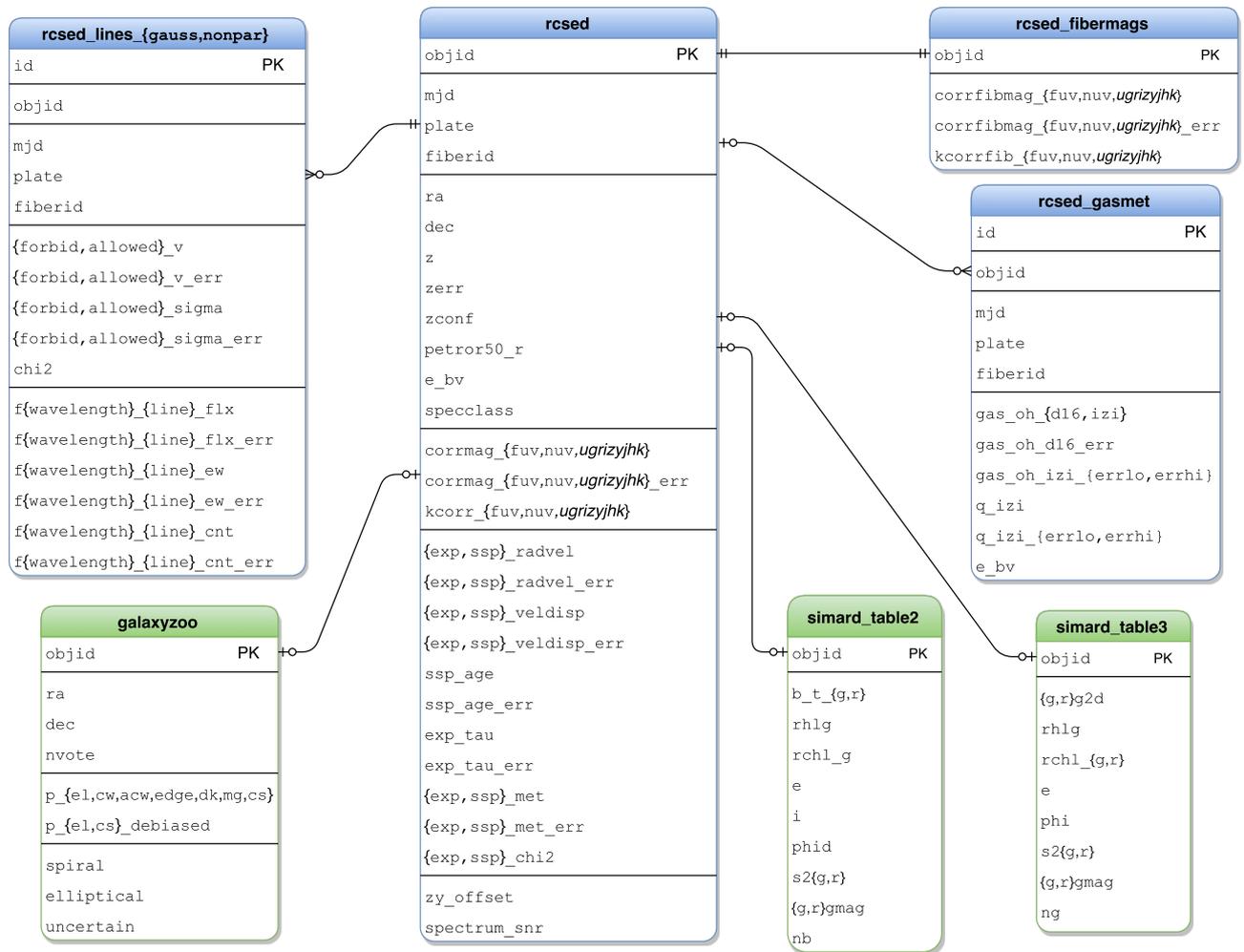


Рис. 1.17: Схема организации связи таблиц в базе данных каталога. Синий цвет обозначает собственные таблицы каталога RCSED, зеленый — внешние базы данных, добавленные в каталог для удобства. Основная таблица `rcsed`, которая соотносится с таблицей `rcsed_fibermags` с помощью первичного ключа `objid`, множественных (необязательных) зависимостей с таблицей измерений газовых металлическихностей `rcsed_gasmet` и множественных (необязательных) зависимостей с таблицами `rcsed_lines_gauss`, `rcsed_lines_nonpar`, содержащими параметрические (гауссовы) и непараметрические измерения эмиссионных линий. `galaxyzoo`, `simard_table2` и `simard_table3` наборы данных, связанные с основой через колонку `objid`, обеспечивают морфологическую классификацию и структурные свойства галактик нашей выборки, используя данные из [Lintott et al. \(2011\)](#) и [Simard et al. \(2011\)](#) соответственно. Все эти таблицы хранятся в схеме базы данных `rcsed`, поэтому правильные названия таблиц будут, например `specphot.rcsed`. Отметим также, что все имена столбцов в базе данных написаны для однородности в нижнем регистре. Та же схема применима и к распределению данных каталога RCSED по FITS-таблицам, доступным для скачивания с веб-сайта проекта.

```

INTO mydb.RCSED_SDSS
FROM PhotoObj AS p, SpecObj as s
WHERE
    s.bestObjid = p.objID
    AND s.z >= 0.007
    AND s.z < 0.6
    AND s.specClass IN (dbo.fSpecClass('GAL_EM'), dbo.fSpecClass('GALAXY'))

```

Этот запрос вернул 800 311 рядов с 12 повторяющимися объектами, для которых таблица SDSS SpecObj содержит 2 записи несмотря на то, что в документации SDSS указано, что таблица очищена от повторений. Мы убрали эти повторяющиеся спектры, выбрав записи с более высоким S/N из каждой пары повторений (и поэтому имеющую, например, лучшую оценку красного смещения). С этого момента мы продолжали работу с выборкой из 800 299 галактик.

Затем координаты полученных галактик были загружены в веб-сервис *GALEX* CasJobs, и выполнен следующий запрос в схеме *GALEXGR6Plus7*:

```

SELECT
    sdss.objid,
    galex_objid,

    nuv_mag, nuv_magerr, fuv_mag, fuv_magerr,
    nuv_mag_aper_1, nuv_magerr_aper_1, nuv_mag_auto,
    fuv_mag_aper_1, fuv_magerr_aper_1, fuv_mag_auto,
    e_bv
INTO mydb.RCSED_SDSS_GALEX

FROM
    (
        SELECT
            s.objid,
            (SELECT objid FROM dbo.fGetNearestObjEq(s.ra, s.dec,
0.05)) AS galex_objid
        FROM
            mydb.RCSED_SDSS_coords AS s
    ) AS sdss
JOIN
    photoObjAll AS p
    ON sdss.galex_objid = p.objid

```

Этот запрос вернул 485 996 рядов.

1.1.6 Заключение

В разделе представлен каталог RCSED однородных спектрофотометрических данных в широком спектральном диапазоне от ультрафиолетового до инфракрасного для примерно 800 000 галактик на малых и средних красных смещениях ($0.007 < z < 0.6$) из спек-

троскопической выборки галактик SDSS DR7, дополненный информацией из различных источников. Для каждой галактики в каталоге RCSED представлены:

- исправленные за k -поправки и поглощение в Галактике интегральные распределения энергии в спектре для галактик в диапазоне от дальнего ультрафиолета до ближнего инфракрасного, полученные из обзоров SDSS (оптический), *GALEX* (УФ) и UKIDSS (ближний ИК диапазон);
- исправленные за k -поправки и поглощение в Галактике распределения энергии в спектре в $3''$ апертурах, соответствующих апертуре световодов SDSS;
- результаты аппроксимации спектров SDSS методом NBURSTS, включающие: а) оригинальные спектры SDSS; б) наилучшее приближение абсорбционного континуума моделью простого звездного населения (SSP) в спектральном диапазоне $3700 < \lambda < 6800 \text{ \AA}$ и моделью звездного населения с экспоненциально спадающей историей звездообразования (exp-SFH) в спектральном диапазоне $3900 < \lambda < 6800 \text{ \AA}$; в) оценки радиальных скоростей звезд, дисперсии скоростей звезд, возраста, экспоненциальная шкала для exp-SFH модели, металличности для двух наборов моделей звездных населений;
- результаты анализа эмиссионных линий с использованием параметрических (гауссовых) и непараметрических профилей линий, включающих: а) исправленные за поглощение в Галактике потоки в эмиссионных линиях; б) оценки покраснения внутри галактик для систем с доминирующим механизмом возбуждения молодыми звездами, рассчитанные по бальмеровскому декременту; в) радиальные смещения скоростей по отношению к звездам; г) характерные ширины эмиссионных линий для параметрической аппроксимации линий;
- дополнительную информацию о галактиках из других каталогов: а) результаты двумерной балдж+диск декомпозиции изображений галактик (Simard et al., 2011) и б) морфологическая классификация галактик проекта Galaxy Zoo (Lintott et al., 2008)

Каталог полностью интегрирован в инфраструктуру международной Виртуальной Обсерватории и доступен через веб-приложение и как ресурс ВО, предоставляющий доступ через интерфейсы IVOA TAP и IVOA SSAP к табличным данным и спектрам, соответственно.

В дополнение к этому мы предоставили полиномиальную аппроксимацию формы красной последовательности для различных цветов на диаграмме цвет–величина и усредненные цвета для галактик 6 морфологических типов от эллиптических, до поздних спиральных и неправильных и различных светимостей (гигантские галактики, галактик промежуточных светимостей и карликовые галактики).

Наш каталог может использоваться в различных исследовательских проектах, которые можно разделить на две группы: а) статистические исследования свойств галактик и б) поиск и открытие галактик редких типов.

В будущем мы собираемся расширить наш каталог на бóльшие красные смещения, включив в рассмотрение публично доступные спектры из архива Смитсоновской Астрофизической Обсерватории¹⁴, полученные при помощи многоволоконного спектрографа

¹⁴<http://oirsa.cfa.harvard.edu/>

Нестоспек ([Fabricant et al., 2005](#)) на 6.5-м телескопе ММТ, и обзора DEEP2 ([Newman et al., 2013](#)), выполненного на спектрографе DEIMOS 10-м телескопа Кека. Мы также планируем расширить покрытие по длинам волн путем добавления инфракрасных данных обзора всего неба со спутником *WISE* (*Wide-field Infrared Survey Explorer*) ([Wright et al., 2010](#)).

1.2 Третий каталог рентгеновских источников *XMM-Newton*

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работе [Rosen et al. \(2016\)](#). Часть методических результатов представлена в работе [Zolotukhin et al. \(2016a\)](#).

В этом разделе кратко описывается последняя версия каталога *XMM-Newton*, 3XMM. Оригинальный каталог 3XMM имел порядковый номер релиза 4 (DR4). Следующий релиз данных 3XMM-DR5 включил в себя дополнительный год наблюдений и соответственно на 7% больше регистраций объектов по сравнению с 3XMM-DR4. Общее количество рентгеновских регистраций в 3XMM-DR5 составляет 565 962, которые соответствуют 396 910 уникальным источникам. Медианный поток объектов из каталога при этом равен $\sim 2.4 \times 10^{-14}$ эрг с⁻¹ см⁻² (0.2–12.0 кэВ), а временной интервал наблюдений — 13 лет. Каталог 3XMM-DR5 покрывает 877 квадратных градусов ($\sim 2.1\%$ от полной площади неба) с учетом перекрытия экспозиций. Он примерно на 60% больше по числу зарегистрированных объектов, чем предшествующий каталог 2XMMi-DR3 и в 5 раз больше, чем текущая версия каталога источников *Chandra* ([Evans et al., 2010](#)). 3XMM был существенным образом улучшен благодаря последним разработкам в программном пакете SAS обработки данных *XMM-Newton* и новой более точной калибровочной информации. Улучшения коснулись характеристики источников, количества ложных обнаружений, точности астрометрической калибровки, минимальной чувствительности и отношения сигнал/шум для автоматического создания кривых блеска и спектров объектов.

3XMM удачно дополняет другие свежие рентгеновские каталоги, такие как каталог источников *Chandra*, упоминавшийся выше, каталог 151 524 точечных источников рентгеновского телескопа *Swift* 1SXPS (*Swift* X-ray Telescope (XRT) Point Source) ([Evans et al., 2014](#)), созданный по данным 8 лет наблюдений *Swift*-XRT. 1SXPS почти в 2.5 раза превышает область покрытия 3XMM, но собирающая площадь телескопа *Swift*-XRT более, чем в 10 раз меньше, чем у *XMM-Newton* ([Longinotti, 2014](#)). Другие более ранние каталоги покрывали все небо, например, обзор всего неба обсерватории *ROSAT* (*ROSAT all-sky survey*) (RASS [Voges et al., 1999](#)), но существенно меньшая чувствительность *ROSAT* по сравнению с *XMM-Newton* означает, что каталог RASS содержит всего 20% от числа объектов в 3XMM-DR4. При этом надо понимать, что разные рентгеновские каталоги в сочетании с 3XMM могут использоваться, например, для исследований долгосрочной переменности объектов.

В этом разделе мы не будем касаться всех технических нюансов создания крупнейшего каталога рентгеновских источников, подробно описанных в работе [Rosen et al. \(2016\)](#). Вместо этого здесь представлены ключевые характеристики каталога и данных, на основе которых он построен, а также некоторые детали, привнесенные автором диссертации в процесс создания каталога, а именно статистически обоснованная компиляция каталога уникальных источников из списка неуникальных рентгеновских регистраций. В конце описывается фотонная база данных и веб-приложение для научного анализа каталога,

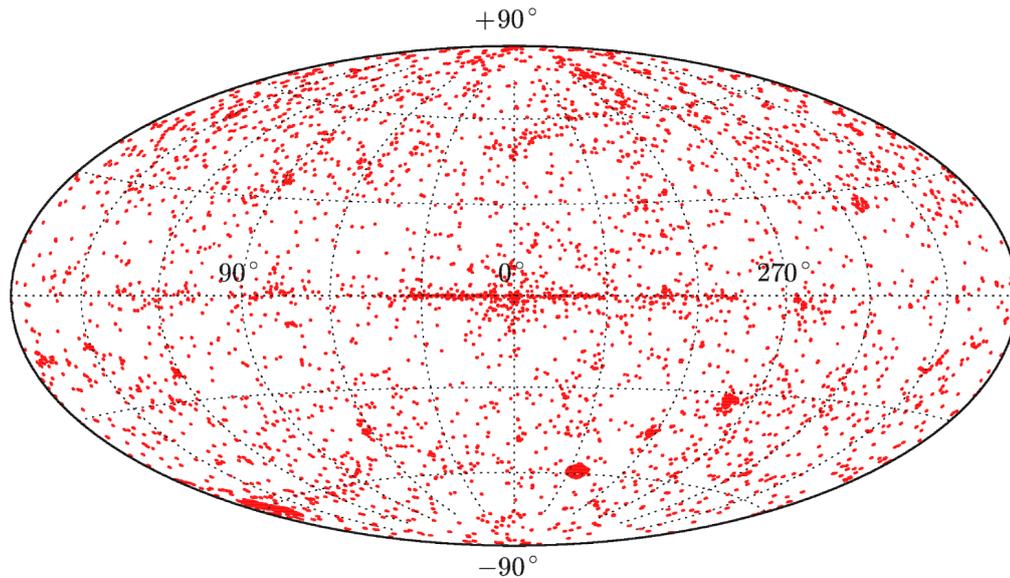


Рис. 1.18: Равновеликая проекция Хаммера-Аитофа в Галактических координатах 7781 наблюдений, вошедших в каталог 3XMM-DR5.

ставшие ключевыми компонентами научных исследований, представленных в Главе 4.

1.2.1 Наблюдения, вошедшие в каталог

3XMM-DR5 создан по данным 7781 наблюдений на *XMM-Newton* EPIC, ставших публично доступными до 31 декабря 2013 года. Карта всех наблюдений, вошедших в 3XMM-DR5, представлена в равновеликой проекции Хаммера-Аитофа в Галактических координатах на Рис. 1.18. В обработанный набор данных также вошли 440 наблюдений, которые были публично доступны в момент создания предыдущей версии каталога 2XMMi-DR3, но не были включены в него либо из-за высокого уровня фона, либо из-за исправленных с того времени проблем с автоматической обработкой. В настоящую версию каталога, таким образом, вошли все наблюдения, содержащие более, чем 1 кс чистых данных (>1 кс интервала хорошего времени, т.е. времени после фильтрации непригодных для анализа данных). На Рис. 1.19 показано распределение по длительности чистого времени 7781 наблюдений, сделанных с *толстым*, *средним* или *тонким* фильтром. На диаграмме не показаны три наблюдения, сделанные за все время с *открытым* фильтром. В Таблице 1.4 показано количество наблюдений для каждого режима наблюдения и фильтра. Наблюдения с открытым фильтром были обработаны автоматической системой, но в них не применялся поиск источников и, таким образом, они не вошли в каталог.

Одним из важных отличий от 2XMMi-DR3 является включение в набор данных наблюдений, выполненных в режиме мозаики. Большинство наблюдений на *XMM-Newton* выполнены в режиме неподвижной экспозиции, когда космический аппарат направлен на фиксированное положение на небе в течение всего наблюдения. Однако начиная с орбиты 1812 (30 октября 2009 года) был добавлен мозаичный режим наблюдений, при котором выполняется последовательность экспозиций вокруг определенного положения на небе по наперед заданной наблюдателем сетке. Данные нескольких экспозиций в составе мозаичного наблюдения записываются в один наблюдательный файл (observation data file,

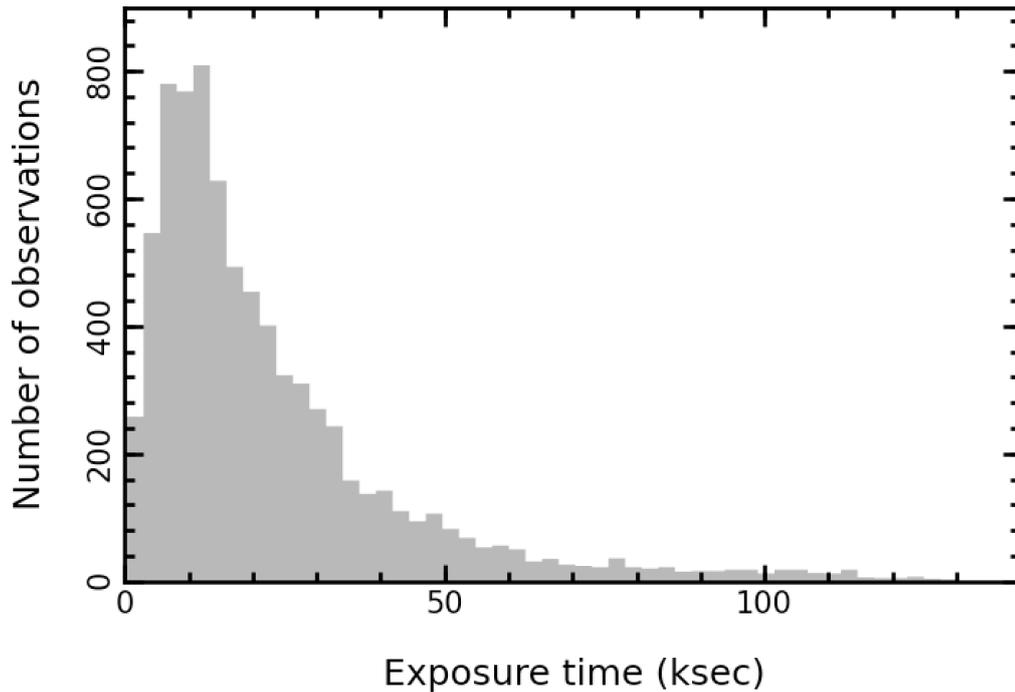


Рис. 1.19: Распределение наблюдений в каталоге 3XMM-DR5 по длине чистого времени экспозиции после фильтрации непригодных для анализа интервалов (для каждого наблюдения взято максимальное по трем детекторам значение).

ODF). В предыдущих версиях автоматической обработки данных *XMM-Newton* из таких наблюдений в лучшем случае обрабатывалась единственная экспозиция, поскольку система обработки отбрасывала остальные кадры, считая, что ориентация космического аппарата потеряла стабильность и отклонилась от цели более, чем на $3'$. Данные остальных кадров мозаики полностью исключались из обработки. В 2012 году Центр Научного Контроля *XMM-Newton* (Science Operations Centre, SOC) разработал схему, при которой родительский файл ODF мозаичного наблюдения разбивался на несколько ODF по одному на каждую отдельную дочернюю экспозицию. Таким образом, ориентация телескопа была зафиксирована для каждой отдельной экспозиции внутри мозаики. Этот подход был применен к мозаичным наблюдениям и похожим на них наблюдениям с гидированием (tracking) до орбиты 1812. Для наблюдения, выполненного в режиме мозаики, первые 8 цифр 10-значного идентификатора наблюдения OBS_ID совпадают для родительского и дочерних наблюдений. При этом для родительского наблюдения OBS_ID почти всегда заканчивается на 01, а для дочерних наблюдений применяется последовательная нумерация, начиная с 31. Дочерние экспозиции наблюдения в режиме мозаики таким образом легко распознать по OBS_ID с двумя последними цифрами ≥ 31 .

Таким образом, для автоматизированной обработки наблюдения в мозаичных режимах теперь не представляют сложности и не требуют никакой специальной логики. Каждая дочерняя экспозиция обрабатывается как отдельное наблюдение. Поиск источников выполняется отдельно в каждой экспозиции, при этом в перекрывающихся областях кадров источники обнаруживаются независимо друг от друга. Хотя скоординированная обработка перекрывающихся областей принципиально возможна, ее алгоритмы не были доста-

Таблица 1.4: Распределение по режимам 7781 наблюдений *XMM-Newton*, включенных в каталог 3XMM-DR5.

Детектор	Режимы кадра			Фильтры			Итого
	Полный ^a	Окно ^b	Другой ^c	Тонкий	Средний	Толстый	
pn	5853	495	-	3327	2633	388	6348
MOS1	6045	1306	309	3296	3774	590	7660
MOS2	6100	1341	248	3303	3789	597	7689

^a Основной режим полного расширенного окна (Prime Full Window Extended, PFWЕ) и основной режим полного окна (Prime Full Window, PFW); ^b Основной режим большого окна детектора pn (Prime Large Window, PLW) и различные режимы частичного окна детекторов MOS (Prime Partial Window, PPW); ^c другие режимы детекторов MOS (быстрый несжатый (Fast Uncompressed, FU), режим с обновлением хранилища кадров (Refresh Frame Store, RFS)).

точным образом протестированы и отлажены при создании каталога 3XMM.

Всего до крайнего срока вошедших в каталог 3XMM-DR5 наблюдений (8 декабря 2012 года) в мозаичном режиме было выполнено 45 наблюдений, из которых в каталог попали 37 (см. ашпендикс в [Rosen et al. \(2016\)](#), замечание 1). Ни одно из этих наблюдений не было доступно в каталогах до версии 3XMM. Полное количество дочерних экспозиций в мозаичных наблюдениях из каталога 3XMM-DR5 составляет 356.

1.2.2 Обработка данных

Данные, вошедшие в каталоги версии 3XMM обрабатывались последней версией программного пакета SAS и наиболее актуальными доступными на момент обработки калибровками. Большая часть обработки для каталога 3XMM-DR5 была выполнена в декабре 2012 – январе 2013 года. Исключение составили 20 наблюдений, обработанных позднее в течение 2013 года. При этом использовался SAS версии 12.0.1 с некоторыми дополнениями для полностью автоматизированной обработки. Точное описание процедур, использованных в версии cat9.0 автоматизированной обработки данных для каталога, а также коллекция примененных статических калибровочных файлов (current calibration files, CCFs), даны на специальной веб-странице¹⁵.

1.2.3 Создание каталога: уникальные объекты

Каталог рентгеновских регистраций 3XMM содержит все индивидуальные регистрации объектов в наблюдениях из соответствующего списка, который обсуждался выше. Очевидно, что поля зрения разных наблюдений иногда хотя бы частично перекрываются друг с другом — например, потому, что целевой объект наблюдался несколько раз. Вместе с ним несколько раз наблюдались и соседние объекты из его поля зрения. Некоторые рентгеновские объекты таким образом наблюдались неоднократно, в предельном случае до 48 раз. Возникает задача объединить индивидуальные наблюдения объектов (здесь и в других местах диссертации мы называем их регистрациями) и сопоставить их с уникальными рентгеновскими источниками с общим для всех индивидуальных регистраций идентификатором `srcid`. В этом разделе описывается процедура ассоциации индивидуальных

¹⁵http://xmmssc-www.star.le.ac.uk/public/pipeline/doc/04_cat9.0_20121220.153800/det_04_cat9.0_20121220.153800

рентгеновских регистраций в уникальные объекты. В новых каталогах серии 3ХММ она достаточно сильно изменилась по сравнению с алгоритмом, использовавшимся в каталогах серии 2ХММ (см. секцию 8.1 в работе [Watson et al. \(2009\)](#)).

Процесс сопоставления разбит на два этапа. Сначала для каждой регистрации ищутся соответствующие ей регистрации из других наблюдений в пределах радиуса $15''$ от ее положения. При этом исключаются регистрации из этого же наблюдения, которые, по определению, связаны с другими источниками. Алгоритм вычисляет байесовскую вероятность ассоциации каждой пары регистраций по формуле из [Budavári & Szalay \(2008\)](#):

$$p_{match} = \left[1 + \frac{1 - p_0}{B \cdot p_0} \right]^{-1} \quad (1.2)$$

Здесь B — байесов фактор, определяемый как

$$B = \frac{2}{(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)} \exp - \left[\frac{\psi^2}{2(\sigma_1^2 + \sigma_2^2)} \right] \quad (1.3)$$

где σ_1 и σ_2 — радиусы ошибки положения каждой из регистраций (в радианах), а ψ — угловое расстояние между ними (в радианах). $p_0 = N_*/N_1N_2$, где N_1 и N_2 — количество объектов на небе, подсчитанное на основании поверхностной плотности источников в первом и втором поле зрения, а N_* — количество совпадающих объектов между ними. Каждое из этих значений N вычисляется исходя из количества регистраций в каждом из двух наблюдений, промасштабированного на все небо. Величина N_* а priori неизвестна и может быть получена итеративным применением алгоритма. Однако в нашей конкретной задаче мы ищем соответствия между регистрациями, полученными в одном и том же поле зрения одним и тем же инструментом в разные эпохи времени, поэтому во многих случаях значительная часть объектов будет совпадать. На точность этого предположения, несомненно, будут влиять любые различия в организации наблюдений — разное время накопления, режимы наблюдения, фильтры детекторов, положение центра поля зрения (и, следовательно, угловое расстояние источника от центра экспозиции, который определяет переменный по полю зрения фактор виньетирования). Для оценки совокупного влияния всех этих эффектов мы осуществили несколько экспериментов по итеративной оценке N_* , и нашли, что значение $N_* = 0.9 \min(N_1, N_2)$ является хорошим приближением N_* без необходимости вычислять точное значение в каждом конкретном случае. В конце этого шага, когда мы имели список всех пар со значениями вероятностями их ассоциации, мы отбросили те, которые имели вероятность $p_{match} < 0.5$.

На втором шаге осуществлялась кластеризация регистраций. Для каждой регистрации вычислялось единственное значение, обозначаемое нами как добротность кластеризации (goodness-of-clustering, GoC), представлявшее собой количество соответствий, которые данная регистрация имеет с другими регистрациями, нормализованное на площадь кружка неопределенности ее положения (`poserr` в терминах колонок каталога). Эта мера добротности помогает выделить регистрации, которые лежат ближе к центру кластера (группы) регистраций и, следовательно, более надежно соответствуют данному уникальному объекту. Затем список всех регистраций сортируется по значению добротности. Алгоритм проходит по списку в направлении уменьшения GoC и для каждой регистрации анализирует пары с другими регистрациями, отсортированные по значению p_{match} . Спус-

каясь по этому списку, для каждой пары алгоритм выбирает одну из четырех возможностей назначить уникальный идентификатор `srcid` источника: а) если обе регистрации уже были сопоставлены уникальному источнику и уже таким образом имеют одинаковый `srcid`, ничего дополнительно предпринимать не нужно; б) если ни одна из пары регистраций не имеет `srcid`, обоим присваивается новый одинаковый `srcid`; в) если только одна регистрация имеет назначенный `srcid`, второй назначается тот же самый; г) если обе регистрации из пары имеют назначенные `srcid`, которые отличаются, мы имеем дело с неоднозначной ассоциацией — в этом случае существующие `srcid` оставляются без изменений и обе регистрации помечаются флагом, указывающим на неоднозначность их ассоциации с источником.

Этот подход объединения регистраций в уникальные источники работает в подавляющем большинстве случаев. Тем не менее в некоторых сложных случаях алгоритм может приводить к неоднозначным результатам. Примером таких ситуаций являются повторные наблюдения областей с ложными регистрациями на переменном фоне диффузного рентгеновского излучения или вблизи очень ярких объектов. В большинстве подобных случаев регистрации имеют соответствующие предупреждающие флаги, выставленные вручную оператором (см. секцию 7.5 в работе [Watson et al. \(2009\)](#)).

Существует еще несколько сценариев, приводящих к похожим проблемам: а) источники с проблемами определения центра — например, в случае перенакопления (*pile-up*); б) случаи, когда астрометрическая калибровка экспозиции не срабатывает автоматически и ошибки положения для всех регистраций на кадре превышают значение по умолчанию в $1.5''$, которое мы принимаем для полей без астрометрической калибровки; в) источники с имеющимися артефактами профиля яркости — например, попадающие на дорожку переноса сигнала от яркого объекта по детектору (*out-of-time events*) или имеющие горячие пиксели; г) регистрации источников с большими собственными движениями (которые в настоящей версии не учитываются программами автоматической обработки) могут оказаться сгруппированы в несколько уникальных источников вместо одного вдоль вектора его собственного движения.

В результате применения этого алгоритма в каталоге 3XMM-DR5 239 505 регистраций были сгруппированы в 70 453 уникальных источников, которые наблюдались более одного раза.

1.2.4 Фотонная база данных

Помимо каталога источников мы создали базу данных всех фотонов, зарегистрированных детектором EPIC/rp на обсерватории *XMM-Newton* за 7781 наблюдение, проведенные между 2000 и серединой 2013 года в режиме изображения. Это те же самые наблюдения, которые были использованы для компиляции каталога 3XMM-DR5. Данные по фотонам были взяты из списков событий под названием *PIEVL1*, файлы с которыми находятся в публичном доступе в научном архиве *XMM-Newton*¹⁶. Это готовые для анализа данные, полученные в результате автоматизированной обработки, выполненной XMM SSC, которые тем не менее не входят в основной релиз данных каталога 3XMM. Каждый файл представляет собою бинарную таблицу с одной строкой на каждое событие (зарегистрированный фотон), которая содержит следующую информацию: а) время события (по часам спутника); б) пиксельные координаты на матрице ПЗС и небесные координаты относительно

¹⁶<http://xmm.esac.esa.int/xsa/>

номинального центра поля зрения; в) скорректированная и некорректированная энергия события; г) флаг качества события; д) номер чипа ПЗС. Каждый файл PIEVLI также содержит метки интервалов хорошего времени¹⁷, определенных независимо для каждого чипа ПЗС с помощью системы автоматизированной обработки XMM SSC. Отметим, что необязательно извлекать весь наблюдательный архив *XMM-Newton* (архив ODF) для массового анализа временных рядов данных *XMM-Newton*.

Эти списки событий представляют наиболее детальные данные низкого уровня, которые мы использовали для первого приближения в анализе временных рядов. Они дополнены данными более высокого уровня в форме каталога 3XMM-DR5 и их индивидуальных регистраций, которые играют важную роль в навигации по фотонной базе данных. Связь между этими разными наборами информации достигается путем трансформации между пиксельными координатами событий и мировыми координатами рентгеновских источников из каталога 3XMM-DR5. Мы использовали данные трансформации координатной системы WCS, доступные для каждой экспозиции EPIC/rp в файле PIEVLI. Таким образом, возможно извлечь список фотонов для любой рентгеновской регистрации из каталога 3XMM-DR5, используя ее мировые координаты, прямое восхождение и склонение.

Объекты из каталога 3XMM-DR5 были отождествлены с другими каталогами астрономических объектов, чтобы найти возможные соответствия и определить классификацию или, например, принадлежность источника к галактике с известным расстоянием. Таким образом, мы получаем возможность легко извлекать произвольные списки фотонов — например, все фотоны из галактики M31, или все фотоны от всех известных магнетаров.

Еще один важный этап без которого невозможен тонкий анализ списков фотонов — это барицентрическая поправка, то есть приведение времени событий, зарегистрированных по часам обсерватории *XMM-Newton*, к системе отсчета, связанной с барицентром Солнечной системы. Для этой цели мы использовали файлы орбит *XMM-Newton* и скрипт *barycen* из *XMM-Newton* SAS версии 13.5, используя в качестве мировых координат фотонов положения источников из каталога 3XMM-DR5.

Отметим, что в результате настоящей работы был организован открытый доступ к фотонной базе данных и к каталогу 3XMM-DR5 с помощью удобного веб-интерфейса¹⁸, который был разработан автором во время работы над созданием каталога 3XMM-DR5 и поиском пульсаций в фотонной базе данных (см. Раздел 4.2). В частности, впервые стало возможно извлекать приведенные к барицентру фотоны *XMM-Newton* в произвольной области неба прямо в веб-браузере без необходимости устанавливать специальное программное обеспечение и загружать большие массивы сырых данных наблюдений *XMM-Newton*. Дополнительные детали устройства веб-сайта для быстрого и простого анализа данных *XMM-Newton* будут представлены в отдельной статье (Zolotukhin et al., в работе). Также будет уместно уточнить, что само научное веб-приложение каталога источников и фотонной базы *XMM-Newton* стало логическим продолжением наработок в созданных автором ранее ресурсах — Каталоге рассеянных скоплений ГАИШ МГУ <http://ocl.sai.msu.ru> (Glushkova et al., 2010) и Энциклопедии экзопланет <http://exoplanet.eu> (Schneider et al., 2011).

¹⁷Пригодные для научного анализа интервалы данных после фильтрации периодов протонных вспышек и других негативных явлений, осложняющих работу с данными.

¹⁸<http://xmm-catalog.irap.omp.eu>

Глава 2

Исследования рентгеновских источников

Глава посвящена изучению Галактических рентгеновских источников разной природы в больших массивах публично доступных в Виртуальной Обсерватории данных. В основном предметом изучения стали катаклизмические переменные (Раздел 2.1) и постоянные маломассивные рентгеновские двойные (Разделы 2.2, 2.3 и 2.4). Одним из важных результатов данной главы стала возможность гибкой многоволновой классификации рентгеновских объектов различных типов, которая среди прочего лежит в основе исследований в Главе 4.

Катаклизмическими переменными (cataclysmic variable, CV) звездами являются взаимодействующие двойные системы, состоящие из белого карлика в качестве основной звезды и вторичного компонента — маломассивной звезды позднего типа главной последовательности. Вторичный компонент, двигаясь вокруг основной звезды с характерным периодом 1 сутки, заполняет свою полость Роша и начинает терять вещество. Падающее на белый карлик без магнитного поля вещество формирует аккреционный диск. Такие системы разделяют на три подкласса: новые звезды (катаклизмические переменные, испытывающие термоядерную вспышку на поверхности белого карлика, что приводит к увеличению оптической светимости на 6–19 звездных величин), карликовые новые звезды (катаклизмические переменные, у которых дисковая неустойчивость приводит к квазипериодическим вспышкам и временному увеличению яркости на 2–8 величин) и новоподобные катаклизмические звезды (неэруптивные катаклизмические переменные, характеризующиеся примерно постоянным высоким темпом аккреции вещества, мощным аккреционным диском и высокой светимостью).

В магнитных катаклизмических переменных основной компонент обладает магнитным полем, которое частично (переходные полярны) или полностью (полярны) разрушает аккреционный диск. Полный и сравнительно недавний обзор всех классов катаклизмических переменных звезд с их свойствами приводится в работе [Warner \(1995\)](#).

В последние годы многие авторы предпринимали масштабный поиск катаклизмических переменных в больших публично доступных обзорах (например, [Szkody et al., 2002](#); [Witham et al., 2007, 2008](#); [Denisenko & Sokolovsky, 2011](#)). Особенно подходящими для такого рода исследований являются $H\alpha$ обзоры нового поколения. Фотометрический $H\alpha$ обзор северной Галактической плоскости (IPHAS), покрывающий $-5^\circ < b < +5^\circ$ по Галактической широте, предоставляет величины в двух широкополосных фильтрах SDSS r' и i' и

узкополосном фильтре $H\alpha$ для порядка 300 млн. источников до $r' \sim 20$ звездной величины. Детальное описание обзора приводится в работе [Drew et al. \(2005\)](#).

Используя двухцветную диаграмму $(r' - i')$ от $(r' - H\alpha)$ как основной метод анализа, [Witham et al. \(2006\)](#) утверждают о 70% уровне обнаружения уже известных CV звезд по данным обзора IPHAS, потому что эти объекты имеют уверенно определяемую в фотометрической системе обзора IPHAS $H\alpha$ эмиссию. Такой метод дает эффективный критерий для отделения катаклизмических звезд от звезд поля.

Следующие три раздела посвящены маломассивным рентгеновским двойным системам. Маломассивные рентгеновские двойные (low-mass X-ray binaries, LMXB) представляют собой двойные системы с компактным объектом (нейтронной звездой или черной дырой), аккрецирующим вещество маломассивной звезды-компаньона. Первые подобные системы были обнаружены более 50 лет назад ([Giacconi et al., 1962](#)) и к настоящему моменту их известно около сотни в нашей Галактике (например, [Liu et al., 2007](#)) и несколько сотен в других галактиках (см., например, [Fabbiano, 2006](#); [Evans et al., 2010](#)). Популяция LMXB представляет собой удобный инструмент для исследования различных физических процессов, которые обуславливают ее свойства — таких, как эффективность переноса энергии в течение фазы с общей оболочкой, влияние на эволюцию гравитационного излучения и особенностей магнитного поля старых нейтронных звезд. Кроме того, через популяцию LMXB можно исследовать свойства хозяйских галактик — например, возраст их звездного населения. Для того, чтобы эти исследования были успешными, требуется лучше понимать, как образуются и эволюционируют LMXB и иметь чистую их выборку с известными ключевыми параметрами (орбитальным периодом, рентгеновской светимостью и др.)

Одним из основных препятствий на этом пути является отсутствие надежных измерений орбитального периода для большинства известных LMXB. В первую очередь это вызвано тем фактом, что из-за геометрических причин очень редко наблюдается модуляция рентгеновского излучения с орбитальным периодом (маломассивная звезда-компаньон перекрывает для компактного объекта незначительную долю от полного неба, вследствие чего лишь небольшая часть LMXB демонстрирует затмения или уменьшения наблюдаемого потока), в то время как наблюдение изменений оптического либо ИК потока представляет большие сложности из-за его слабости.

Однако иногда возможно оценивать орбитальные периоды LMXB косвенным способом, используя тот факт, что их оптическое и ИК излучение возникает главным образом во внешних частях аккреционного диска, перерабатывающих рентгеновское излучение центрального компактного объекта (см., например, [McClintock et al., 1979](#); [van Paradijs & McClintock, 1994](#)). Эффективность этого подхода продемонстрирована в работе [van Paradijs & McClintock \(1994\)](#), где было показано существование корреляции между абсолютной звездной величиной LMXB в оптическом диапазоне и рентгеновской светимостью с орбитальным периодом. Необходимо однако оговориться, что этот метод физически мотивирован лишь для *постоянных* LMXB, обладающих стационарным аккреционным диском и неизменной рентгеновской светимостью. Транзиентное поведение может вести за собой большую переменность в рентгеновской светимости и/или структуре аккреционного диска и таким образом отклонение от любой гипотетической корреляции. Вполне разумно также ожидать значительного отклонения от корреляции, если центральная рентгеновская светимость источника частично скрыта от наблюдателя из-за большого наклона

плоскости двойной системы к лучу зрения — так называемые источники с короной аккреционного диска (accretion disc corona, ADC), например, 4U1822–37.

Как известно, большинство LMXB в нашей Галактике (как транзиентные, так и постоянные) находятся в ее плоскости и таким образом подвержены большому поглощению из-за пыли вдоль луча зрения, достигающему $A_V \sim 10\text{--}30$ зв. величин, что полностью исключает возможность их изучения в оптическом диапазоне и смещает наблюдательные методы в сторону больших длин волн. Таким образом, надежные измерения абсолютной звездной величины для многих LMXB возможны лишь в ИК диапазоне. Следовательно представляется разумным откалибровать корреляцию наподобие [van Paradijs & McClintock \(1994\)](#) в ИК, в частности, в полосе K .

На этом пути есть определенные сложности. Распределение энергии в спектре (spectral energy distribution, SED) LMXB в ИК диапазоне может содержать дополнительный вклад оптически тонкого синхротронного излучения, которое иногда наблюдается в красной части ближнего ИК диапазона вплоть до радио в постоянных ([Migliari et al., 2010](#)) и — особенно часто — в транзиентных LMXB (см., например, [Corbel & Fender, 2002](#); [Russell et al., 2006, 2007](#); [Shahbaz et al., 2008](#); [Russell & Fender, 2008](#)). Эта проблема должна быть аккуратно исследована прежде, чем будет возможно построение надежного соотношения период–светимость для K полосы.

Во втором разделе настоящей главы мы показываем, что форма SED постоянных LMXB в оптическом и ближнем ИК диапазонах может быть достаточно хорошо описана в рамках простой модели, когда оптическое и ближнее ИК излучение возникает вследствие переработки рентгеновского излучения центрального компактного объекта в аккреционном диске и на поверхности звезды-донора. Это дает основание полагать, что существует физическая связь между основными свойствами двойной системы и ее инфракрасной светимостью. В разделе представлена корреляция абсолютной звездной величины LMXB с рентгеновской светимостью и орбитальным периодом наподобие соотношения в фильтре V , найденного [van Paradijs & McClintock \(1994\)](#). Для ее построения мы рассматриваем только лишь постоянные LMXB в предположении, что структура аккреционного диска не меняется между эпохами наблюдения. Кроме того, мы рассматриваем только LMXB с нейтронными звездами с целью исключить неопределенности, связанные с массой компактного объекта.

В последующих — третьем и четвертом — разделах данной главы мы продолжаем серию работ по отождествлению рентгеновских двойных систем, начатую во время работы над кандидатской диссертацией ([Zolotukhin, 2009a](#); [Zolotukhin et al., 2010](#); [Zolotukhin & Revnivtsev, 2011](#)), целью которых является систематическое изучение несмещенной выборки постоянных LMXB в оптическом, ближнем инфракрасном и инфракрасном диапазонах. Выборка постоянных LMXB взята из глубокого обзора Галактики, выполненного обсерваторией *INTEGRAL* в диапазоне энергий 17–60 кэВ ([Krivonos et al., 2007](#); [Revnivtsev et al., 2008](#)), свободном от эффектов, связанных с межзвездным поглощением в диске Галактики. Поскольку, как упомянуто выше и обсуждается детально в Разделе 2.2, оптическая и ИК светимость LMXB связана в основном с переработкой рентгеновского излучения в аккреционном диске (хотя на более длинных волнах возможен вклад от джета, см. в дополнение к ссылкам выше [Homan et al. \(2005\)](#); [Migliari et al. \(2010\)](#)), из оптических и ИК данных мы сможем сделать оценку размеров аккреционного диска и, следовательно, орбитальных параметров двойной системы. В двух заключительных разделах Главы 2

мы изучаем источники, расположенные в направлении на центр Галактики, большинство из которых вероятно расположены в Галактическом балдже (см., например, дискуссию в [Revnivtsev et al. 2008](#)). Этот факт дает важное преимущество по сравнению с любым другим произвольным набором LMXB — в случае отсутствия оценок расстояния до источника будет вполне оправдано принять за него каноническое расстояние 8 кпк до балджа.

В качестве одного из первых шагов в этом направлении мы предприняли целенаправленный поиск неопубликованных оптических и ИК данных в наблюдательных архивах и Виртуальной Обсерватории (ВО) для набора источников, представляющих интерес в контексте этой задачи. Мы используем обзор UKIDSS телескопа UKIRT ([Lawrence et al., 2007](#)), обзор GLIMPSE обсерватории *Spitzer* ([Benjamin et al., 2003](#); [Churchwell et al., 2009](#)) и обзор всего неба обсерватории *WISE* ([Wright et al., 2010](#)) для исследования выборки предполагаемых Галактических рентгеновских источников, в основном кандидатов в LMXB с нейтронными звездами, чтобы получить оценки их блеска в ИК диапазоне и по ним ограничить их физическую природу.

2.1 Обнаружение новой катаклизмической переменной звезды AX J194939+2631 с помощью Виртуальной Обсерватории

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работе [Zolotukhin & Chilingarian \(2011\)](#).

С помощью методов Виртуальной Обсерватории мы открыли новую катаклизмическую переменную звезду среди неотожествленных объектов в рентгеновском обзоре Галактической плоскости *ASCA Galactic Plane Survey*.

Сначала мы идентифицировали AX J194939+2631 с ярким источником излучения в линии $H\alpha$ IPHAS J194938.39+263149.2 среди 400 объектов обзора IPHAS, попадающих область неопределенности рентгеновских координат радиусом $1'$, а затем идентифицировали AX J194939+2631 со слабым рентгеновским источником в архиве *Chandra*.

Наши последующие спектральные наблюдения на 3.5-м телескопе Calar Alto подтвердили классификацию исследуемого объекта как катаклизмической переменной звезды вероятно магнитной природы. Наш анализ показывает, что AX J194939+2631 представляет собой двойную звездную систему, расстояние до которой $d \approx 0.6$ кпк. По-видимому, эта двойная система содержит вторичный компонент в виде карлика позднего *K* или раннего *M* типа и частично разрушенный аккреционный диск, который проявляет себя в виде $H\alpha$ линии с двойным профилем.

2.1.1 Идентификация объекта AX J194939+2631

Поскольку мы интересуемся идентификацией рентгеновских источников в оптическом или инфракрасном диапазонах с характерными субсекундными ошибками координат ([Zolotukhin et al., 2010](#); [Zolotukhin & Revnivtsev, 2011](#)), мы применили подход [Witham et al. \(2006\)](#) для идентификации катаклизмических переменных звезд среди неизвестных рентгеновских источников с *большими* позиционными ошибками, в отличие от традиционных подходов к идентификации объектов.

Мы использовали рентгеновский обзор галактической плоскости *ASCA Galactic Plane Survey* ([Sugizaki et al., 2001](#)), выполненный в 1996–1999 годах в полосе $|l| \lesssim 45^\circ$, $|b| \lesssim 0.4^\circ$ и

частично перекрывающийся с обзором IPHAS. Изначально этот обзор предназначался для исследования протяженного рентгеновского хребта Галактики (Revnivtsev et al., 2009). Он содержал 163 точечных источника ярче, чем $10^{-12.5}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ в диапазоне 0.7–10 кэВ, из которых 107 объектов остались без оптической/ИК идентификации. С тех пор предпринимались неоднократные дополнительные наблюдения для изучения неотожествленных объектов ASCA (например, Kaur et al. (2010)). Однако в своих попытках исследователи часто сталкивались с проблемами высокой плотности источников в Галактической плоскости в области радиусом $1'$ (характерная ошибка определения положения в обзоре ASCA) и, соответственно, высокой вероятности случайного совпадения.

В нашей работе мы применили новую концепцию исследований с помощью Виртуальной Обсерватории (Chilingarian et al., 2009a), заключающуюся в следующих трех этапах: 1) полуавтоматический поиск объектов-кандидатов с помощью технологий и инфраструктуры Виртуальной Обсерватории; 2) последующие наблюдения; 3) интерпретация вновь полученных данных совместно с доступной информацией Виртуальной Обсерватории. Примечательно, что представляемая в этой главе идентификация рентгеновского источника на основе Виртуальной Обсерватории была выполнена в ходе обучающего семинара для студентов в Государственном Астрономическом Институте имени П.К. Штернберга в мае 2009 года.

Поскольку мы искали катаклизмические переменные среди неотожествленных источников ASCA, мы сначала максимизировали соответствующую вероятность путем преселекции объектов, 1) попадающих в первичный релиз данных обзора IPHAS, 2) обладающих достаточно жестким рентгеновским спектром (фотонный индекс $\Gamma < 3$), и 3) с большой оцененной плотностью на луче зрения ($N_H > 10^{22} \text{см}^{-2}$), свидетельствующей о большом расстоянии до Солнца. Таким образом, мы получили список из шести источников, которые предположительно не являются коронально активными звездами по определению используемых критериев селекции. Далее мы вручную исследовали диаграмму цвет–цвет по данным IPHAS в полях с радиусом $1.3'$ вокруг ASCA координат этих источников. Мы произвольно увеличили окно ошибки с $1'$, которая заявлена в обзоре Sugizaki et al. (2001), до $1.3'$. Для быстрой визуализации мы использовали такие инструменты Виртуальной Обсерватории, как CDS ALADIN (Bonnarel et al., 2000) и TOPCAT (Taylor, 2005).

Для одного из шести объектов, AX J194939+2631, мы обнаружили единственный и легко отождествляемый $\text{H}\alpha$ источник в данных IPHAS (см. Рис. 2.1). Несмотря на наличие других источников с признаками излучения в линии $\text{H}\alpha$, IPHAS J194938.39+263149.2 является в поле единственным объектом с надежно определяемым потоком в $\text{H}\alpha$ (см. Рис. 2.1). По данным узкополосной фотометрии мы оценили эквивалентную ширину $\text{H}\alpha$ в 30–60 Å, что полностью соответствует типичным значениям для катаклизмических переменных звезд. Поскольку источник попал на край индивидуальных ПЗС кадров IPHAS, он наблюдался 14 июля 2005 года три раза с 01:04 UT по 02:24 UT. Благодаря этому мы обнаружили, что объект обладает четкой переменностью с амплитудой 0.2 зв. вел. в фильтрах i' и $\text{H}\alpha$ (см. Таблицу 2.1). Этот объект также попал в 4-й релиз данных обзора UKIRT Infrared Deep Sky Survey (UKIDSS) (Lawrence et al., 2007). На Рис. 2.3 показано распределение энергии в спектре исследуемого источника. Дополнительная важная информация об объекте была получена из каталога USNO-B1.0 (Monet et al., 2003).

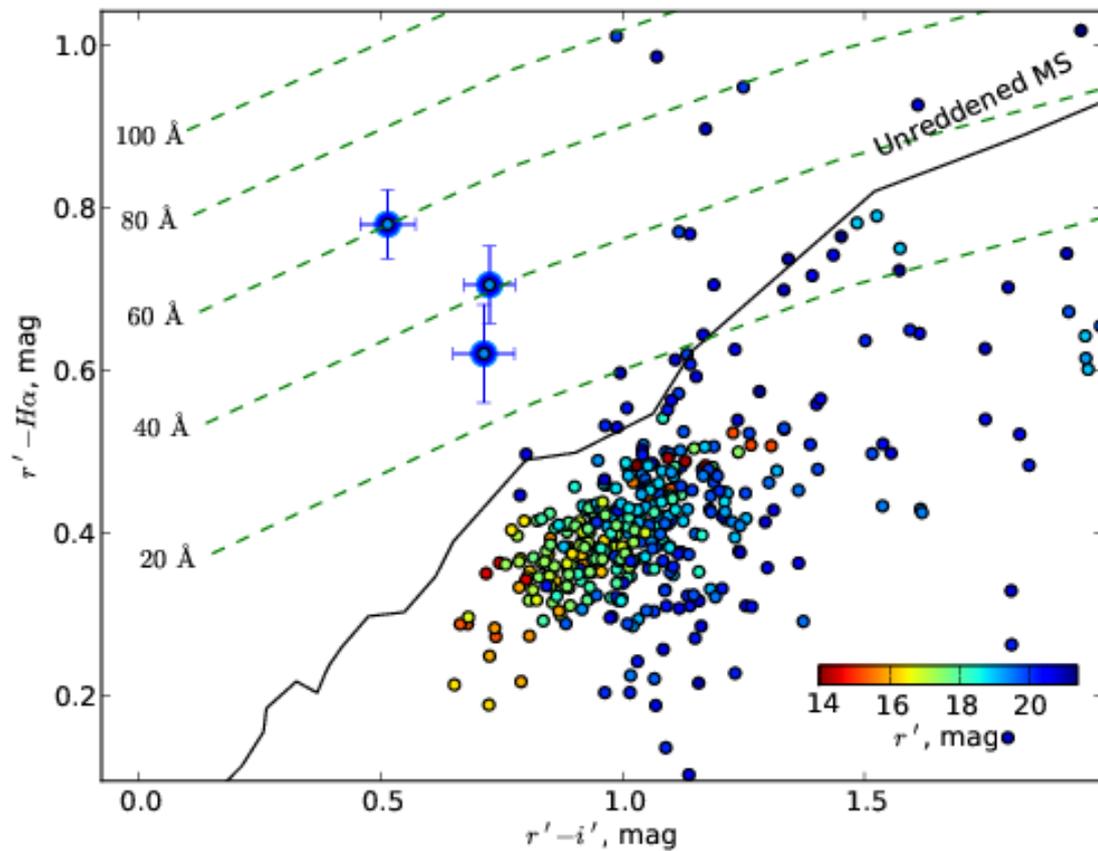


Рис. 2.1: Диаграмма цвет–цвет регистраций (не источников; каждый уникальный источник может быть зарегистрирован несколько раз) IPHAS в поле радиусом $1.3'$ вокруг объекта AX J194939+2631. Объекты с избытком в H_{α} расположены в верхней части диаграммы. Величины в фильтре r' изображены цветом. Черная сплошная линия показывает главную последовательность (ГП) без учета покраснения пылью. Зеленая пунктирная линия соответствует звездам ГП с постоянной эквивалентной шириной H_{α} , значение которой показано слева (взято из [Drew et al. \(2005\)](#)). Три различные регистрации источника IPHAS J194938.39+263149.2 отмечены большими кружками и соответствуют единственному сильному источнику H_{α} эмиссии в поле. Окна ошибок, приведенные для исследуемого объекта, также применимы к другим измерениям.

2.1.2 Дополнительные данные

2.1.2.1 Рентгеновские данные *Chandra*

После предварительной идентификации исследуемого объекта с наиболее выделяющимся $\text{H}\alpha$ источником в поле, мы проанализировали ранее еще не опубликованные рентгеновские данные этой области неба, который были получены обсерваторией *Chandra* 8 января 2008 года в ходе наблюдений по программе Murray (2006) (программа ID 8236).

Рентгеновское изображение, полученное с экспозицией 1740 с на детекторе *Chandra*/ACIS, содержит единственный слабый объект внутри окна ошибок ASCA в точке с координатами RA=19:49:38.39, Dec=26:31:49.1 (J2000), который в пределах своей погрешности координат ($0.6''$) согласуется с оптическим источником IPHAS J194938.39+263149.2. Рентгеновские данные содержат лишь 116 фотонов, которые соответствуют потоку 1.05×10^{-12} эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ в диапазоне 0.5–10 кэВ, что не дает возможности надежно охарактеризовать спектр объекта (см. Рис. 2.4). Тем не менее наилучшая аппроксимация спектра степенной моделью дает значение фотонного индекса 1.5 и величину плотности по лучу зрения $N_{\text{H}} \simeq 5.5 \pm 0.5 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$.

Данные *Chandra* дали нам возможность подтвердить ассоциацию яркого $\text{H}\alpha$ источника с объектом AX J194939+2631 и оценить плотность атомов поглощающего вещества на луче зрения. После тщательного изучения ВО ресурсов мы получили достаточное количество информации об исследуемом объекте (см. Таблицу 2.1) для проведения дополнительных детальных наблюдений. На этом этапе мы четко понимали, что источник является либо катаклизмической переменной звездой, либо массивной рентгеновской двойной системой (high-mass X-ray binary, НМХВ), о чем свидетельствовали фотометрические оценки эквивалентной ширины $\text{H}\alpha$ и жесткий рентгеновский спектр.

2.1.2.2 Оптическая спектроскопия

Для того, чтобы выбрать между НМХВ и катаклизмической переменной, мы провели дополнительные спектроскопические наблюдения. Данные были получены 12 июля 2009 года в сервисном режиме наблюдений с длиннощелевым спектрографом TWIN, установленным на 3.5-м телескопе обсерватории Calar Alto, в рамках заявки “Optical spectroscopy of AX J1949.6+2631” (P.I.: IZ) на резервное директорское наблюдательное время. Полное время накопления составило 2.5 часа (5 экспозиций длительностью 1800 с). Одновременно использовались дифракционные решетки T08 и T10 для синего и красного рукавов спектрографа TWIN с шириной щели $1.2''$, покрывающие спектральный диапазон 3800–5600 Å и 5550–6900 Å со спектральным разрешением $R \approx 2500$ и $R \approx 5000$, соответственно. Также были получены калибровочные кадры смещения (bias), плоского поля, He-Arg лампы и спектр звезды спектрофотометрического стандарта *Feige 110*.

Мы использовали систему редукции спектральных данных, реализованную на языке IDL и состоящую из таких же шагов редукции, которые были представлены в Chilingarian et al. (2009c). Главным отличием является лишь процедура вычитания вклада ночного неба. Полученные спектры с инструментом TWIN в используемой нами конфигурации являются умеренно дискретизованными в синем рукаве спектрографа и плохо дискретизованными в красном рукаве (FWHM~1 пикс). Чтобы предотвратить артефакты вследствие интерполяции плохо дискретизованных линий ночного неба, мы применили методику, предложенную Kelson (2003). Мы использовали всю длину щели ($6'$) для получения

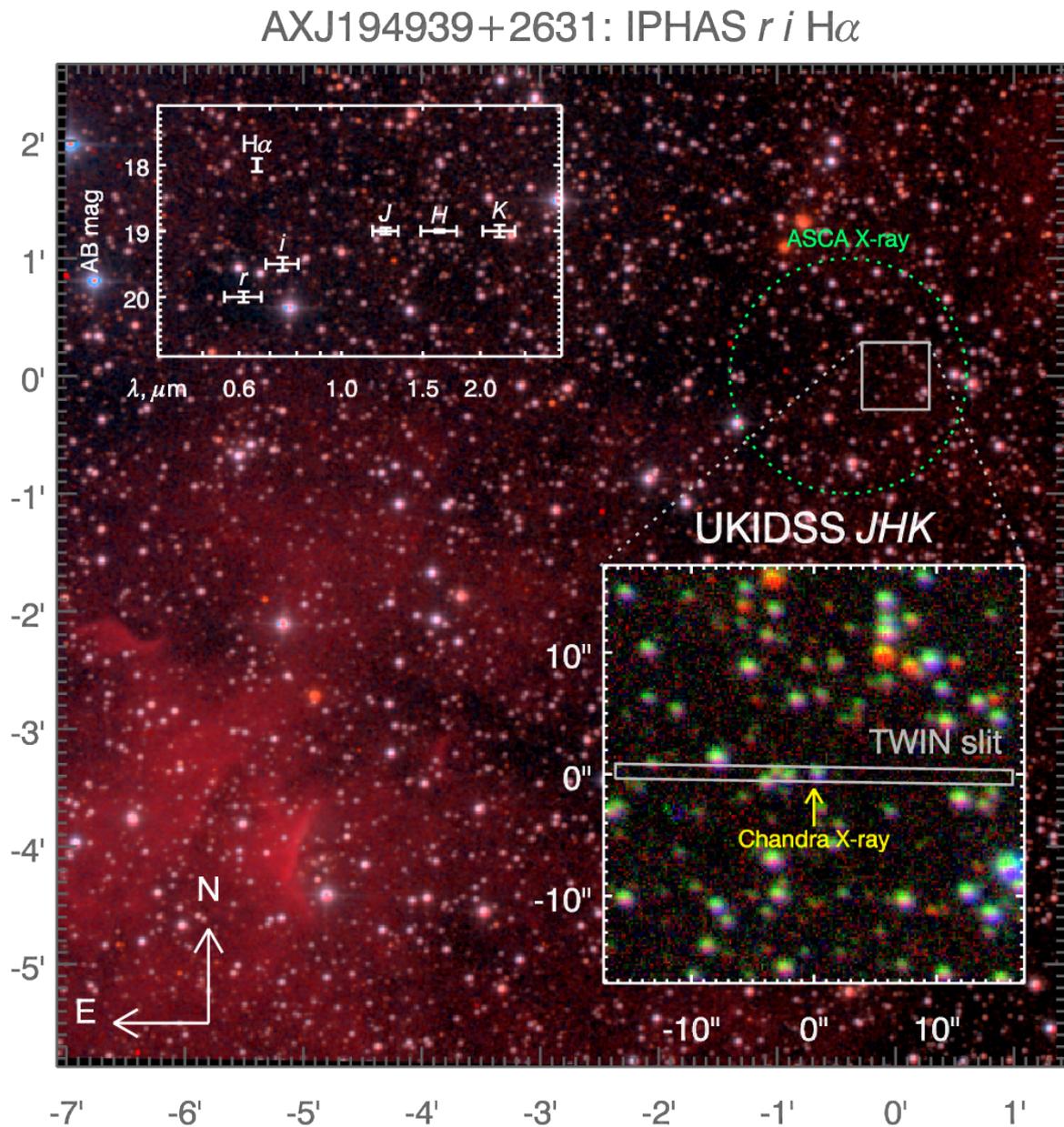


Рис. 2.2: Доступные в Виртуальной Обсерватории данные для AX J194939+2631. На заднем плане показано композитное изображение, созданное с помощью алгоритма [Lupton et al. \(2004\)](#), из изображений в фильтрах r' , i' и $H\alpha$ в красном канале. Ошибка координат *ASCA* изображена зеленым кружком. Фрагмент изображения $30 \times 30''$, содержащий источник IPHAS J194938.39+263149.2, показан в инфракрасных данных UKIDSS в правой нижней части картинки. Рентгеновский источник по данным *Chandra* показан стрелкой, там же нарисована щель спектрографа TWIN телескопа обсерватории Calar Alto.

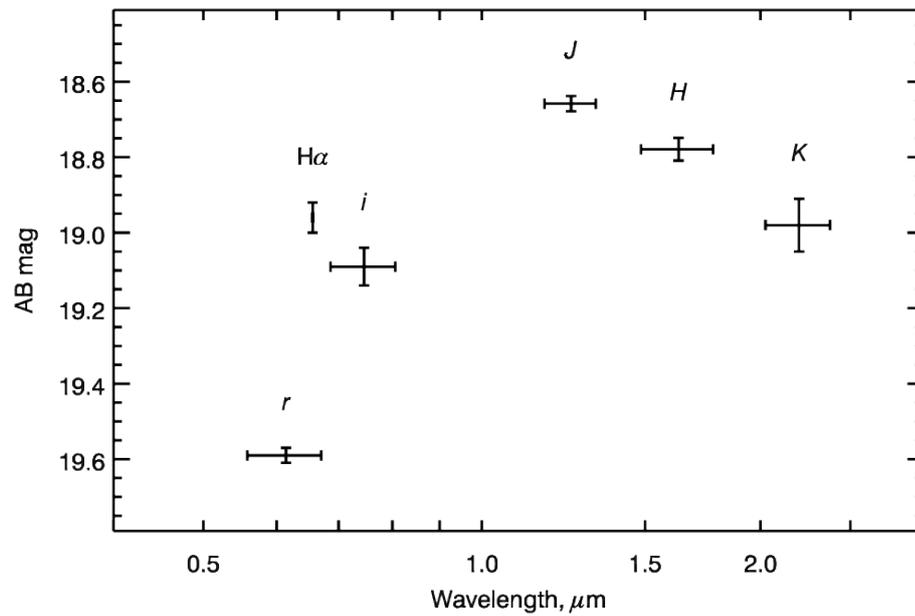


Рис. 2.3: Восстановленное распределение энергии в спектре исследуемого источника в оптическом и ближнем ИК диапазоне.

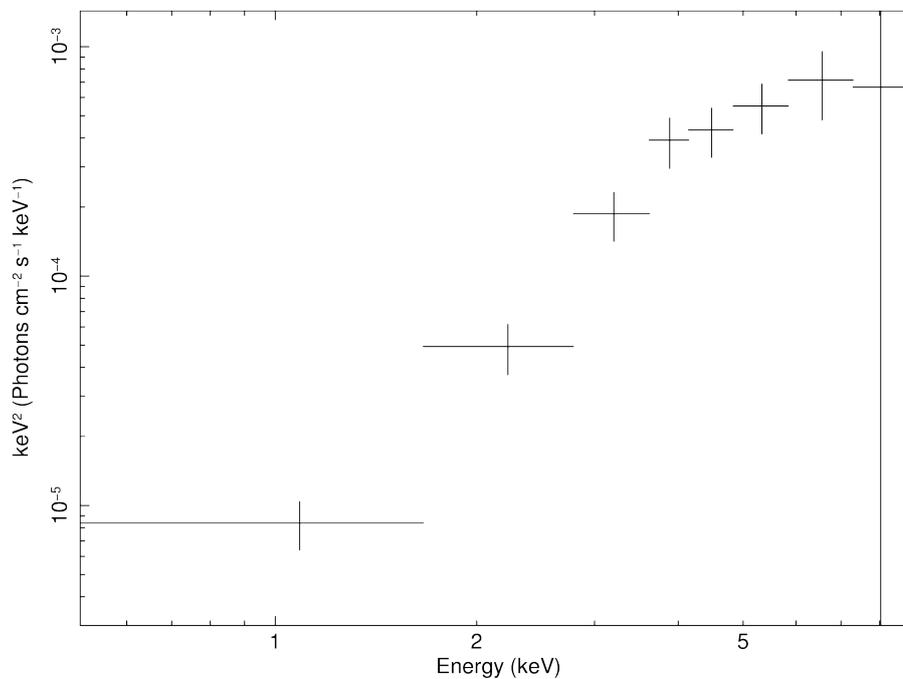


Рис. 2.4: Рентгеновский спектр AX J194939+2631, полученный с экспозицией 1740 с на детекторе *Chandra*/ACIS в рамках наблюдательной программы Murray (2006).

Таблица 2.1: Сводная таблица имеющихся в Виртуальной Обсерватории данных для объекта AX J194939+2631 после его отождествления с источником IPHAS J194938.39+263149.2. Звездные величины IPHAS даны для трех последовательных эпох (см. текст).

<i>ASCA</i>	
Объект	AX J194939+2631
(l, b)	$(62.937^\circ, 0.203^\circ)$
Поток в диапазоне 0.7–10 кэВ	0.97×10^{-12} эрг с ⁻¹ см ⁻²
Спектральный индекс	$2.61^{+2.43}_{-1.40}$
Плотность вещества на луче зрения	$3.39^{+1.99}_{-1.73} \times 10^{22}$ см ⁻²
IPHAS и UKIDSS	
Объект	IPHAS J194938.39+263149.2
R.A., Dec. (J2000)	$(297.409912^\circ, 26.530325^\circ)$
r'	$19.42 \pm 0.02, 19.48 \pm 0.03, 19.43 \pm 0.02$
i'	$18.69 \pm 0.05, 18.76 \pm 0.06, 18.91 \pm 0.05$
H α	$18.71 \pm 0.04, 18.86 \pm 0.05, 18.65 \pm 0.03$
Экв. ширина H α	переменная, 30–60 Å
J	17.72 ± 0.02
H	17.40 ± 0.03
K	17.08 ± 0.07
USNO-B1.0	
Объект	USNO-B1.0 1165–0456015
$B1$	20.04 зв. вел.
$B2$	20.20 зв. вел.
$R1$	20.12 зв. вел.
$R2$	19.42 зв. вел.
собственное движение, RA	-8 ± 1 mas/год
собственное движение, Dec	-4 ± 11 mas/год
<i>Chandra</i>	
Поток в диапазоне 0.5–10 кэВ	1.05×10^{-12} эрг с ⁻¹ см ⁻²
Плотность вещества на луче зрения	$5.5 \pm 0.5 \times 10^{22}$ см ⁻²
Спектральный индекс	1.5

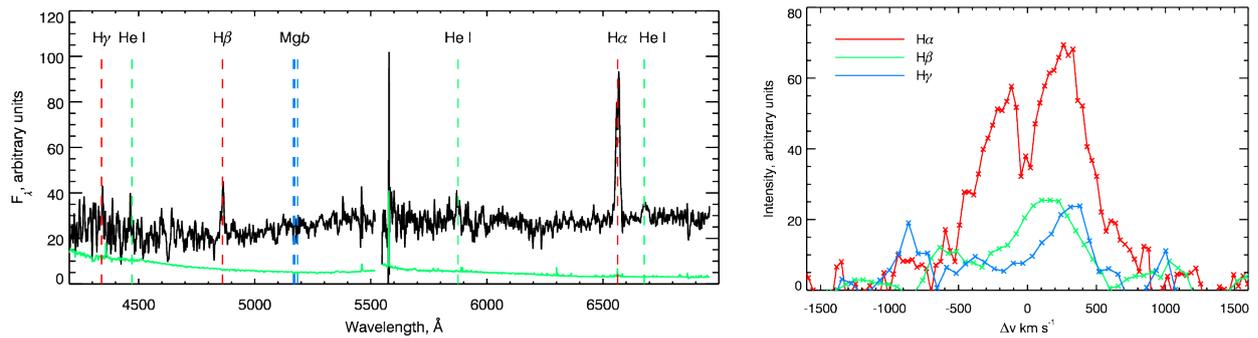


Рис. 2.5: Слева: полученный одномерный оптический спектр AX J194939+2631, сглаженный для наглядности с окном 4 Å. Справа: профили Бальмеровских линий после вычитания континуума. Профили Hβ и Hγ также сглажены с окном 3 Å.

спектра ночного неба в передискретизованном виде, после чего он аппроксимировался бисплайнами 4-го порядка в узлах через каждые 0.3 Å. Такая процедура позволит вычесть спектр ночного неба с точностью до пуассоновских ошибок.

Исследуемый источник проецируется на периферическую III область (см. Рис. 2.2) и поэтому в его спектре присутствуют узкие эмиссионные линии, принадлежащие туманности. Поскольку поверхностная яркость туманности изменяется вдоль цели, наша методика вычитания спектра ночного неба оставляет в результирующем спектре исследуемого объекта заметные (положительные) остатки на месте спектральных линий Hα, [NII] ($\lambda = 6548, 6584 \text{ \AA}$) и [SII] ($\lambda = 6717, 6731 \text{ \AA}$). Чтобы избавиться от этих артефактов, мы интерполировали остатки в узких окнах ($\pm 3 \text{ \AA}$) около этих линий в сегментах размером 6'' с обеих сторон от источника.

После процедуры вычитания вклада ночного неба спектр был линейаризован с использованием дисперсионного уравнения, посчитанного по результатам автоматической идентификации линий в спектре калибровочной He-Ag лампы. Систематическая точность дисперсионного уравнения составила около 0.07 Å и 0.05 Å для синего и красного рукавов спектрографа, соответственно.

Примечательно, что остатки от вычитания спектра ночного неба методикой Kelson (2003) не превышают уровня пуассоновского шума в синем рукаве спектрографа даже в линиях Hβ и [OIII], что свидетельствует о сильном межзвездном поглощении и, соответственно, большом расстоянии до III области.

На Рис. 2.5 показан калиброванный по потоку (в произвольных величинах) спектр источника IPHAS J194938.39+263149.2 после сложения всех экспозиций и экстракции одномерного спектра. Четко видны широкие эмиссионные линии водорода и гелия. Однако линия HeI ($\lambda=4471 \text{ \AA}$) едва детектируется в виду слабой спектральной чувствительности в синем диапазоне. Там, где это возможно, мы вычислили потоки в линиях и эквивалентные ширины, используя оценки уровня псевдо-континуума. Для оценки псевдо-континуума мы маскировали области сильных линий шириной 1000 km s^{-1} в терминах скорости. Полученные оценки эквивалентных ширин и отношений потоков приведены в Таблице 2.2.

Таблица 2.2: Эквивалентные ширины обнаруженных линий и отношения их потоков к $H\alpha$.

Линия	Экв. ширина, Å	Поток в единицах $H\alpha$
$H\alpha$	-44.7 ± 2.5	1.0
$H\beta$	-17.3 ± 3.9	3.5 ± 1.0
$H\gamma$	-10.6 ± 3.3	5.5 ± 2.0
He I 4471	-4.0 ± 3.2	14 ± 11
He I 5876	-5.2 ± 2.5	8.0 ± 4.2
He I 6678	-5.8 ± 1.9	7.3 ± 2.8

2.1.3 Обсуждение

Эмиссия в линии He и абсорбция в центре линии $H\alpha$, обнаруженные в спектре на длинах волн неподвижной системы отсчета, в совокупности с ненулевыми собственными движениями объекта по каталогу USNO-B1.0 (по крайней мере по одной из координат, см. 2.1) однозначно свидетельствуют о принадлежности изучаемого объекта нашей Галактике. Абсорбционная особенность в центре профиля линии $H\alpha$ имеет нулевую систематическую скорость при ошибке скорости около $\pm 50 \text{ км с}^{-1}$. Если бы источник был удаленным, то для его Галактической долготы ($l = 62.9^\circ$) он обладал бы значительной радиальной скоростью за счет дифференциального вращения Галактики. Отрицательное значение собственных движений по прямому восхождению также указывает на расположение объекта в передней части Галактики, то есть ближе, чем 8 кпк. Относительно близкое расположение объекта исключает предположение о его природе как двойной массивной рентгеновской системы, потому что его рентгеновская светимость была бы слишком низкой для этого класса объектов $L_X \simeq 4 \times 10^{33} (d/8 \text{ кпк})^2 \text{ эрг с}^{-1}$.

Слабый наблюдаемый бальмеровский декремент свидетельствует о незначительном межзвездном поглощении. В предположении типичных условий формирования излучения ($H\alpha/H\beta = 2.86$) и стандартного закона экстинкции, $E(B - V) \simeq 0.2$, а $A_V \simeq 0.6$. В этом случае несоответствие с рентгеновскими данными, подверженными влиянию поглощения на луче зрения, может быть объяснено различием в геометрии излучающих областей. Жесткое излучение приходит из центральных областей источника, проходя через локальное поглощающее вещество, тогда как оптический спектр формируется во внешних частях аккреционного диска, где внутренняя экстинкция существенно меньше. Об околозвездной природе рентгеновского поглощения так же свидетельствует полная Галактическая экстинкция на луче зрения, которая по карте поглощения [Schlegel et al. \(1998\)](#) составляет $A_V \simeq 2.1$ зв. вел., что не согласуется со значением $N_H \sim 3\text{--}5 \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$, оцененным по данным *ASCA* и *Chandra* в предположении стандартного закона экстинкции с $R = 3.1$. В трехмерной карте поглощения [Marshall et al. \(2006\)](#) для расстояния 1.5 кпк в направлении на исследуемый источник содержится оценка $A_V \simeq 2$ зв. вел., из чего можно заключить, что объект находится на $d \simeq 500$ пк, если экстинкция масштабируется линейно.

Распределение энергии в спектре источника по данным широкополосной оптической и ИК фотометрии (см. Рис. 2.3) хорошо описывается спектром карликовой звезды раннего класса M, с учетом заявленного голубого избытка цвета в $r' - i'$ ([Hewett et al., 2006](#)), которые занимают наиболее густонаселенную область на распределении цветов известных катаклизмических переменных ([Witham et al., 2006](#)). Едва обнаруживаемая слабая абсорбция в линии Mgb, отсутствие сильных молекулярных полос и красный континуум

также находятся в согласии с предлагаемой классификацией. Ранние М карлики являются слабыми объектами с относительно узким распределением по абсолютным величинам ($M_K = 8-9$). Благодаря этому мы оценили расстояние до объекта по звездной величине в фильтре γ , которая слабо подвержена влиянию пыли, и получили оценку $d \simeq 400-650$ пк, что находится в хорошем согласии с приведенными выше оценками. Таким образом, источник обладает умеренной рентгеновской светимостью в диапазоне энергии 0.7–10 кэВ, $L_X \simeq 2 \times 10^{31}$ эрг s^{-1} для расстояния 600 пк, тем не менее не совсем очевидно как внутренняя экстинкция может влиять на наблюдаемое значение.

Мы обнаружили в оптическом спектре объекта эмиссионные линии водорода вплоть до линии $H\gamma$ и некоторые линии HeI, все они являются характерными особенностями катаклизмических переменных. Однако подобные спектральные детали присущи и другим объектам, таким как активные звезды поздних типов, симбиотические и Ве звезды. Симбиотические звезды демонстрируют абсорбции, как у звезд гигантов поздних типов, и очень широкие эквивалентные ширины линии $H\alpha$ (сотни \AA), которых мы не наблюдаем в нашем спектре. Ве звезды можно легко распознать по характерной форме континуума, который соответствует распределению энергии в спектре для звезды раннего типа, что тоже не соответствует нашим данным. Активные звезды позднего типа, как известно, обладают гораздо более узкой линией $H\alpha$, менее 10 \AA (Pettersen & Hawley, 1989), и сильными молекулярными линиями поглощения, которых в нашем спектре не обнаруживается. Кроме того, все эти типы звезд не имеют столь жесткого рентгеновского спектра, который наблюдается у этого объекта (Рис. 2.4). К тому же наблюдаемая в спектре линия HeI ($\lambda=6678 \text{\AA}$) не предполагается для этих типов звезд (Witham et al., 2007). Таким образом, мы однозначно классифицируем источник как катаклизмическую переменную.

Предполагая $(V - r) = 0$ мы можем оценить изначальное отношение потоков в рентгене и оптике до поглощения F_X/F_{opt} величиной около 10. Такое большое отношение F_X/F_{opt} в совокупности с жестким рентгеновским спектром и значительным внутренним поглощением в рентгене исключает классификацию объекта как *карликовая новая*, и указывает на то, что источник является *новоподобной* переменной звездой с магнитным полем или без него (Warner, 1995). Профиль линии $H\alpha$ с двумя пиками (см. Рис. 2.5) указывает на наличие аккреционного диска, поэтому маловероятно, что источник является поляр. Однако, промежуточный поляр с аккреционным кольцом с наклоном плоскости орбиты $i \sim 60-70^\circ$ вполне может иметь такой профиль линии с абсорбцией в центре и несильным разделением пиков. Мы не можем объяснить однопиковую структуру других эмиссионных линий водорода без риска излишне детальной интерпретации наших относительно шумных данных. Тем не менее, объяснить такую структуру линий можно предполагая различную геометрию излучающих областей¹ и 2.5 ч экспозицию наблюдений при соответствующей фазе вращения. В то же время, если орбитальный период сопоставим или меньше 2.5 ч, это будет свидетельствовать о том, что асимметрия в профиле появляется в результате излучения лишь одного полюса (Warner, 1995; Hellier, 1999).

Мы обращаем внимание на то, основной проблемой интерпретации исследуемого объекта как катаклизмической переменной является отсутствие линий высокой ионизации (HeII, CIII, NIII) в наблюдаемом спектре. Возможно это связано с относительно низким отношением сигнал/шум нашего оптического спектра. Дополнительные данные высокого качества позволят получить более четкие выводы о природе изучаемой системы. Иссле-

¹Отметим, что пики на профиле $H\alpha$ проявляют асимметрию, красный пик выделяется сильнее.

дования рентгеновской периодичности и/или глубокая спектроскопия в различных фазах требуются для подтверждения предварительной классификации этого источника как промежуточный поляр.

2.2 Соотношение период–светимость для постоянных LMXB в ближнем ИК диапазоне

В данном разделе исследуются соотношения между рентгеновской светимостью, орбитальным периодом и абсолютной звездной величиной в ближнем ИК диапазоне для маломассивных рентгеновских двойных (low-mass X-ray binaries, LMXB) с постоянной светимостью. Показывается, что довольно часто распределение энергии в спектре LMXB в оптическом и ближнем ИК диапазонах может быть адекватно описано простой моделью аккреционного диска и звезды-донора, перерабатывающих рентгеновское излучение центрального компактного объекта. С помощью этого факты мы обосновываем, что рентгеновская светимость и абсолютная величина в ИК диапазоне для постоянных LMXB могут быть использованы для надежных оценок их орбитального периода. На примере выборки известных LMXB мы показываем наличие корреляции между L_X , P_{orb} и M_K , которая может быть аппроксимирована прямой линией с разбросом всего лишь в 0.3 звездные величины. Данная корреляция похожа на соотношение найденное [van Paradijs & McClintock \(1994\)](#) в оптическом диапазоне. Она может быть использована для исследования популяции LMXB и особенно важна в свете выполняющихся и запланированных обзоров Галактики в рентгеновском и ИК спектральных диапазонах.

2.2.1 Распределение энергии в спектре LMXB в оптическом и ближнем ИК диапазонах

Для проверки обоснованности нашего подхода к интерпретации излучения LMXB в оптическом и ближнем ИК диапазонах мы предлагаем рассмотреть распределения энергии в спектрах трех “классических” двойных систем — Cyg X–2, Sco X–1 и 4U0614+091. Эти двойные системы покрывают широкий диапазон орбитальных периодов, от 0.81 до 236.27 ч, и имеют ко всему прочему сравнительно надежные оценки расстояния, межзвездного поглощения и, в двух случаях (Cyg X–2 и Sco X–1), наклонения плоскости орбиты. Используемые ниже в спектральном моделировании значения этих величин приведены в Таблице 2.3.

Важно помнить, что в некоторых случаях значительный вклад оптически тонкого излучения наблюдается в различных спектральных состояниях рентгеновских двойных систем (см., например, [Russell et al., 2006](#)). В частности, обнаружение поляризованного инфракрасного излучения в некоторых рентгеновских двойных на уровне, заметно превышающем ожидаемый от рассеяния излучения в межзвездном пространстве, указывает на синхротронное происхождение части ИК потока (см., например, [Shahbaz et al., 2008](#)).

Поэтому для проверки применимости нашей модели оптически толстого излучения мы намеренно отобрали рентгеновские двойные в разных спектральных состояниях, а именно высоком/мягком (Sco X–1 и Cyg X–2) и низком/жестком (4U0614+091).

Для вычисления распределения энергии в спектре LMXB мы используем простую модель (см., например, [Tjemkes et al., 1986](#); [O’Brien et al., 2002](#); [Mescheryakov et al., 2011a](#)),

в которой все элементы поверхности в двойной системе (аккреционный диск и звезда-компаньон) излучают чернотельный спектр с температурой, которая определяется рентгеновским облучением и внутренним нагревом. При этом форма звезды-компаньона полагается совпадающей с полостью Роша.

Температура облученной рентгеновским излучением стороны звезды рассчитывается с учетом прогрева от падающего излучения:

$$T_{\star}^4 = T_{\star,0}^4 + \frac{\eta_{\star} L_X \cos \theta_{\star}}{4\pi\sigma d^2}, \quad (2.1)$$

где L_X — светимость центрального рентгеновского источника, θ_{\star} — угол между направлением на центральный источник и нормалью к поверхности, d — расстояние от рентгеновского источника до элемента поверхности, σ — постоянная Стефана–Больцмана, η_{\star} — доля переработанного рентгеновского излучения. Температура необлученной компактным объектом стороны звезды-компаньона вслед за [de Jong et al. \(1996\)](#) принимается равной $T_{\star,0} = 5800(L/L_{\odot})^{1/4}(R/R_{\odot})^{-1/2}$ К с соотношениями масса–светимость и масса–радиус из [Tout et al. \(1996\)](#). Доля перерабатываемого и переизлучаемого поверхностью звезды-компаньона рентгеновского излучения полагается равной $\eta_{\star} = 0.6$ (см., например, [London et al., 1981](#)).

Для расчета эффективной температуры элемента поверхности аккреционного диска мы используем стандартное соотношение, которое учитывает вязкий нагрев и нагрев падающим рентгеновским излучением во внешних частях геометрически тонкого аккреционного диска:

$$T_d^4 = \frac{3GM_1 L_X}{8\pi\epsilon c^2 \sigma R^3} + \frac{\eta_d L_X}{4\pi\sigma R^2} \left(\frac{H}{R}\right)_{\text{out}} (n-1). \quad (2.2)$$

Мы полагаем $M_1 = 1.4 M_{\odot}$ и $\epsilon = 0.1$ — массу компактного объекта и эффективность аккреции, соответственно, для LMXB с нейтронными звездами.

Доля рентгеновского потока, перехваченная аккреционным диском, вычислялась в предположении, что толщина диска зависит от его радиуса как $H \propto R^n$, где мы полагаем $n = 9/7$ ([Vrtilek et al., 1990](#)). Заметим, что перехватывающей поверхностью может являться не только сам оптически толстый аккреционный диск, но и его корона, перехватывающая часть рентгеновского потока и перенаправляющая его в сторону диска, см., например, [Jimenez-Garate et al. \(2002\)](#); [Mescheryakov et al. \(2011b\)](#). Мы полагаем отношение высоты перехватывающей поверхности к радиусу на внешнем крае аккреционного диска $(H/R)_{\text{out}} = 0.1$. Значение параметра η_d — эффективной доли излучения, перерабатываемого в системе аккреционный диск – корона (отношение рентгеновского потока, термализованного в оптически толстом диске, к падающему потоку) в настоящее время точно неизвестно, разные авторы оценивают его от 0.1 и менее ([de Jong et al., 1996](#)) до ~ 0.5 ([Vrtilek et al., 1991](#)). В нашей работе мы принимаем значение $\eta_d = 0.25$.

Внутренний радиус аккреционного диска принят равным приливному радиусу [Paczynski \(1977\)](#). Более детально наша модель описана в работе [Mescheryakov et al. \(2011a\)](#). Отметим, что возможность предсказывать абсолютную звездную величину LMXB с точностью лучше, чем 0.5–0.8 зв. величины (т.е. лучше, чем фактор 2 по потоку), в основном зависит от точности нашего знания наклона плоскости двойной системы и доли перерабатываемого рентгеновского излучения (при фиксированном радиусе диска и форме перехватывающей рентгеновское излучение поверхности).

Таблица 2.3: Параметры двойных систем, для которых в работе вычисляются распределения энергии в спектре в оптическом и ближнем ИК диапазонах. Орбитальные периоды взяты из [Ritter & Kolb \(2003\)](#). Cyg X-2 и Sco X-1 являются представителями класса Z-источников, поэтому их светимость положена равной эддингтоновской; светимость 4U0614+091 взята из [Revnivtsev et al. \(2011\)](#). Остальные параметры, общие для всех трех систем, описаны в тексте.

	Cyg X-2	Sco X-1	4U0614+091
Расстояние (кпк)	11.6 ± 0.3^1	2.8 ± 0.3^2	3.2^3
P_{orb}	236.27	18.94	0.81
M_1	1.71^4	1.4	1.4
q	0.34^4	0.3^5	0.04^6
$\log L_x$ (эрг/с)	38.3	38.3	36.5
Наклонение	62.5^7	38^5	60^8
A_V	1.34^9	0.91^{10}	2^{11}

(1) – [Smale \(1998\)](#), (2) – [Bradshaw et al. \(1999\)](#), (3) – [Kuulkers et al. \(2010\)](#), (4) – [Casares et al. \(2010\)](#), (5) – [Steehgs & Casares \(2002\)](#), (6) – [Werner et al. \(2006\)](#), (7) – [Orosz & Kuulkers \(1999\)](#), (8) – наклонение неизвестно, произвольное значение, (9) – [McClintock et al. \(1984\)](#), (10) – [Vrtilek et al. \(1991\)](#), (11) – [Migliari et al. \(2010\)](#)

2.2.2 Используемые данные

Мы рассматриваем в данном разделе только *постоянные* LMXB, светимости которых в оптическом, ИК и рентгеновском диапазонах не изменяются существенным образом. Это предположение весьма важно, поскольку ниже используются оценки светимости этих объектов, полученные в разные эпохи.

Рентгеновская переменность ярких (с потоками, превышающими ~ 50 мКраб, что достаточно для регистрации источника монитором всего неба (All-Sky Monitor, ASM) на обсерватории *RXTE* в каждом индивидуальном наблюдении) постоянных LMXB была проанализирована в работе [Postnov & Kuranov \(2005\)](#). Было показано, что типичное долгосрочное среднеквадратичное отклонение их потока не превышает $\sim 20\text{--}30\%$ от среднего значения. Долгосрочные вариации оптического излучения постоянных LMXB исследовались во множестве работ, в частности для источников Sco X-1 ([McNamara et al., 2005](#)), Cyg X-2 ([O'Brien et al., 2004](#)), и 4U0614+091 ([Hakala et al., 2011](#)), рассматриваемых в настоящем разделе. Было найдено, что долгосрочное изменение их видимых звездных величин в оптическом диапазоне обычно не превышает $\sim 0.1\text{--}0.3$ зв. величины (что соответствует изменению $\sim 10\text{--}30\%$ потока).

Таким образом, основываясь на этих данных, мы добавляем дополнительные $\sim 10\text{--}30\%$ к систематической неопределенности потока вследствие одновременных наблюдений, которые используются для анализа корреляции между рентгеновской и оптической светимостью в настоящей работе.

Для создания широкополосных распределений энергии в спектрах наших тестовых объектов мы использовали их многоцветную фотометрию из литературы и в дополнение к этому публично доступные данные космических обсерваторий *Spitzer* (инструменты IRAC ([Fazio et al., 2004](#)) и MIPS ([Rieke et al., 2004](#))) и *WISE* ([Wright et al., 2010](#)).

Таблица 2.4: Фотометрические данные для Cyg X–2. Межзвездное поглощение принято равным $A_V = 1.34$ зв. вел.

Фильтр	Зв. величина (Вега)	A_λ	Испр. зв. величина (Вега)
<i>U</i>	15.0 ¹	2.05	12.9
<i>B</i>	15.3 ¹	1.77	13.5
<i>V</i>	14.8 ¹	1.34	13.5
<i>R</i>	14.0 ²	1.00	13.0
<i>J</i>	13.39 ³	0.38	13.01
<i>H</i>	13.15 ³	0.24	12.92
<i>K</i>	13.05 ³	0.15	12.90

Spitzer

λ , мкм	Поток, мЯн
4.5	1.4
8.0	0.8
24	8.5

(1) – Orosz & Kuulkers (1999), (2) – USNO B1, (3) – 2MASS

Фотометрические измерения в среднем ИК диапазоне были получены в результате анализа калиброванных изображений с телескопа *Spitzer*. Для каждого источника мы определяли поток суммируя отсчеты в круговой апертуре радиусом 6'' (для изображений *Spitzer*/MIPS в фильтре 24 мкм мы использовали апертуру радиусом 9'' из-за большей ширины FWHM функции рассеяния точки PSF у инструмента на этой длине волны), центрированной на объекте, вычитая отсчеты фона в соответствующей апертуре неподалеку.

Дополнительный набор фотометрических измерений был извлечен из предварительного релиза каталога *WISE* (Wright et al., 2010). Преобразование звездных величин в физические потоки было сделано с коэффициентами из работы Cutri et al. (2011).

Все фотометрические измерения были скорректированы за межзвездное поглощение по закону покраснения Rieke & Lebofsky (1985).

Данные на этих длинах волн важны в качестве дополнительной проверки присутствия оптически тонкого синхротронного излучения, наблюдаемого в спектрах LMXB в некоторых случаях (см., например, Migliari et al., 2010).

2.2.2.1 Cyg X–2

Фотометрические измерения Cyg X–2, используемые в данной главе, приведены в Таблице 2.4. Модель широкополосного SED, созданная с параметрами, описанными в тексте и в Таблице 2.3, показана сплошной кривой на Рис. 2.6. Модель представлена “как есть”, без какой-либо нормировки или аппроксимации данных. Положение модельного SED вдоль оси Y зависит от расстояния до источника, доли перерабатываемого в аккреционном диске рентгеновского излучения и наклона плоскости орбиты двойной системы.

Из Рис. 2.6 очевидно, что принятая модель облученного аккреционного диска доста-

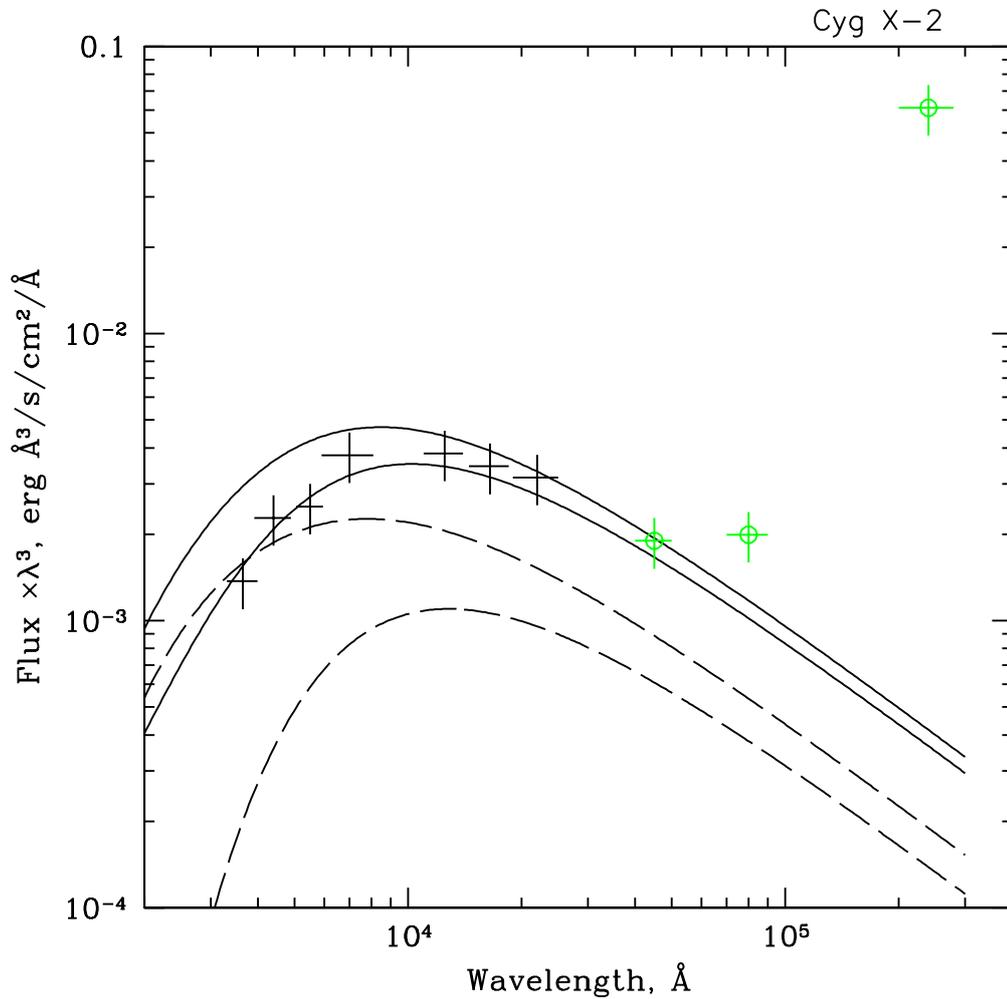


Рис. 2.6: Наблюдаемое распределение энергии в спектре Cyg X–2 в оптическом и ИК диапазонах, исправленное за поглощение, и его модель (см. текст). Модель не вписана в данные, а представлена “как есть”, исходя из параметров, описанных в тексте и представленных в Таблице 2.3. Пунктирными линиями показан вклад звезды-компаньона в общий поток двойной системы. Две пунктирные кривые соответствуют геометрической конфигурации минимума и максимума этого вклада. Чтобы учесть возможную переменность оптического и ИК излучения двойной системы, мы добавили 0.2 зв. величины к неопределенности каждого фотометрического измерения. Открытые кружки показывают измерения, полученные в настоящей работе из данных *Spitzer*.

точно адекватно описывает распределение энергии в спектре Cyg X–2 везде, кроме длинноволновой части (8 и 24 мкм). Из этого факты мы делаем следующие выводы: 1) наша модель адекватно описывает SED Cyg X–2 вплоть до ~ 4 мкм, и 2) на более длинных волнах мы наблюдаем некую дополнительную компоненту в спектре, связанную по всей видимости с оптически тонким синхротронным излучением нетепловых электронов. Поляризационные измерения на этих длинах волн, указывающие на то, что в ИК диапазоне у Cyg X–2 действительно может иметь место вклад синхротронного излучения, были представлены в работе [Shahbaz et al. \(2008\)](#).

2.2.2.2 Sco X–1

Набор фотометрических измерений Sco X–1 в оптическом и ИК диапазонах, полученных в разные эпохи разными инструментами, представлен в Таблице 2.5. Из нее становится очевидно, что Sco X–1 демонстрирует значительную переменность SED на длинных волнах, тогда как в оптическом диапазоне изменения потока несущественны (см., например, [McNamara et al., 2005](#)). Это неудивительно, поскольку эта двойная система известна своей переменностью в радио диапазоне (например, [Pandey et al., 2007](#)), что по сути означает наличие компоненты в ее спектре, связанной с нетепловыми электронами. Кроме того, было показано, что Sco X–1 имеет поляризованное излучение, интенсивность которого превышает уровень, ожидаемый от рассеяния света на межзвездной пыли ([Shahbaz et al., 2008](#); [Russell & Fender, 2008](#)), что опять является аргументом в пользу излучения, связанного с нетепловыми электронами. Наконец, присутствие еще одной компоненты в спектре, отличающейся от оптически толстого излучения, рассматриваемого в нашей модели, связано с появлением жесткого хвоста в рентгеновском диапазоне, который часто наблюдается у Sco X–1 (например, [D’Amico et al., 2001](#); [Paizis et al., 2006](#)). Скорее всего он связан с излучением энергичных нетепловых электронов в аккреционном потоке (см., например, [Migliari et al., 2007](#)).

Однако несмотря на эти сложности можно отметить, что один набор измерений в ближнем ИК диапазоне (а именно данные из работы [Willis et al. 1980](#)) все же показывает SED типа Рэля–Джинса, что указывает на малость вклада дополнительной компоненты, связанной с нетепловыми электронами, в ту эпоху наблюдения. В дальнейшем мы будем использовать именно эту оценку звездной величины в полосе K . Важно отметить, что цвет $J - K$ может служить индикатором наличия этой синхротронной компоненты в спектре объекта. В частности, наша модель предсказывает для Sco X–1 цвет $J - K \sim -0.15$ зв. вел. (см. ниже), тогда как самые яркие в ближнем ИК диапазоне наблюдения достигают $J - K = 0.6$ зв. величины. В момент наименьшего потока в ближнем ИК диапазоне этот цвет имеет значение $J - K = -0.19$ зв. величины, что достаточно хорошо согласуется с предсказаниями нашей модели.

2.2.2.3 4U0614+091

Фотометрические измерения 4U0614+091 заимствованы из работы [Migliari et al. \(2010\)](#). Легко заметить (и это обсуждается в [Migliari et al. 2010](#)), что источник имеет оптически тонкую компоненту в спектре в среднем ИК диапазоне, и ее вклад в поток в фильтре K сравним со вкладом от оптически толстого диска, описываемого в нашей модели. По этой причине мы вычисляем звездную величину 4U0614+091 в фильтре K на основании

Таблица 2.5: Фотометрические данные для Sco X-1. Межзвездное поглощение принято равным $A_V = 0.91$ зв. вел.

Фильтр	Зв. величина (Вега)	A_λ	Испр. зв. величина (Вега)
<i>B</i>	12.38 ¹	1.78	11.04
<i>V</i>	12.40 ²	0.91	11.49
<i>R</i>	12.3 ³	0.68	11.62
<i>J</i>	11.90 ⁴	0.25	11.65
<i>H</i>	11.54 ⁴	0.15	11.39
<i>K</i>	11.15 ⁴	0.10	11.05
<i>J</i>	11.94 ⁵	0.25	11.69
<i>H</i>	11.99 ⁵	0.15	11.84
<i>K</i>	11.98 ⁵	0.10	11.88

<i>Spitzer</i>	
λ , мкм	Поток, мЯн
3.5	9.3
4.5	7.1
5.8	4.5
8.0	3.7
24	1.3

<i>WISE</i>	
3.35	10.4
4.60	7.0
11.5	2.5
22.0	<3.0

(1) – McNamara et al. (2005), (2) – McNamara et al. (2003), (3) – USNO B1, (4) – 2MASS, (5) – Willis et al. (1980)

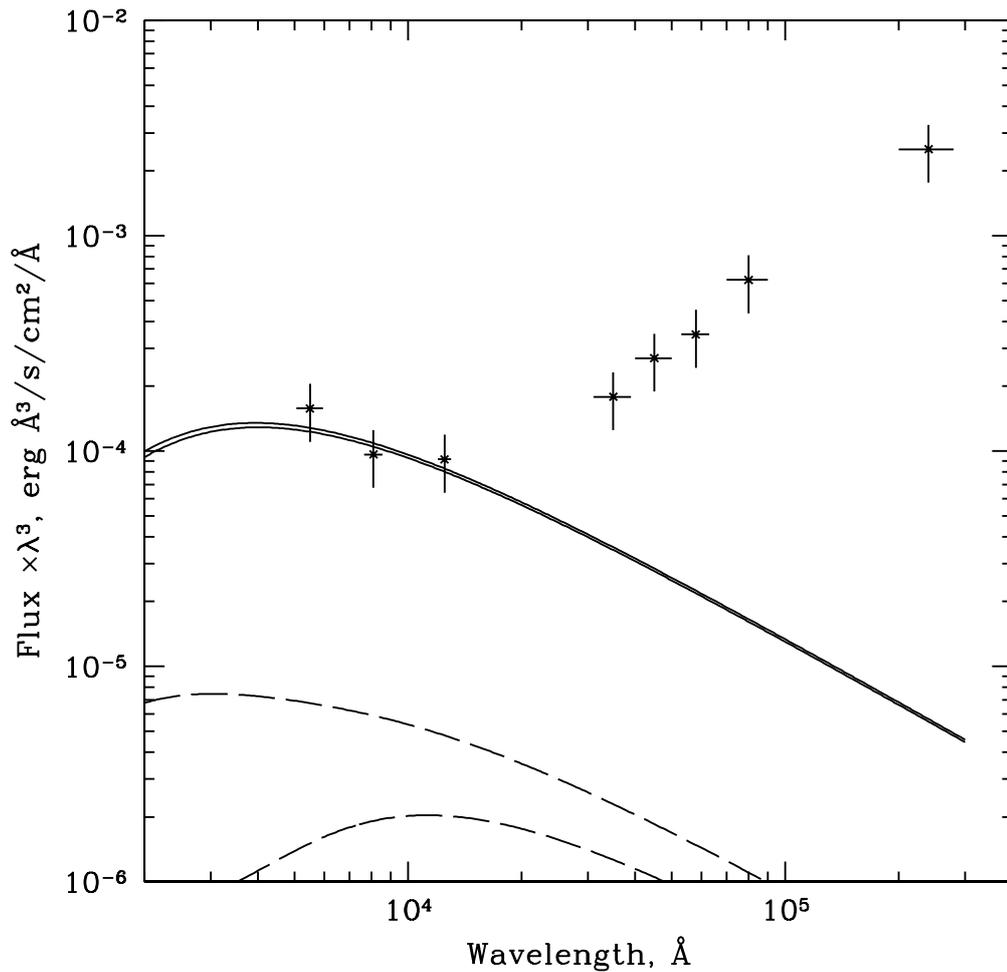


Рис. 2.8: То же, что и на Рис. 2.6, но для 4U0614+091.

измерения в фильтре *J Migliari et al. (2010)*, используя нашу модель оптически толстого излучения (см. Рис. 2.8). В дальнейшем в работе применяется именно это значение.

2.2.3 Соотношение $M_K - \Sigma_K$ для постоянных LMXB

2.2.3.1 Модель

Распределения энергии в спектрах классических LMXB, построенные на основе широкополосной фотометрии в предыдущем разделе, дают нам основания полагать, что мы сравнительно хорошо понимаем физические процессы, ответственные за наблюдаемые в оптическом и ИК диапазонах характеристики LMXB.

В соответствии с нашей моделью абсолютные звездные величины LMXB в оптическом и ближнем ИК диапазонах зависят от рентгеновской светимости компактного объекта в них и размера двойной системы. *van Paradijs & McClintock (1994)* показали, что светимость системы в оптической полосе V увеличивается примерно как квадратный корень из рентгеновской светимости и как орбитальный период в степени $2/3$. Обратим внимание, что эта зависимость не противоречит теоретическим соображениям, если учесть, что температура вещества, которое дает основной вклад в оптическое излучение, лежит в диапазоне

$T \approx 10000\text{--}30000$ К. Для такой температуры поверхностная яркость абсолютно черного тела зависит от нее как $S_V \propto T^{\approx 2}$. В нашем случае фильтра K в ближнем ИК диапазоне это соотношение должно быть другим.

Будет естественным ожидать, что в постоянных LMXB эффективная температура аккреционного диска везде превышает температуру рекомбинации водорода. Эффективная температура, при которой наступает тепловая нестабильность диска, определяется соотношением [Dubus et al. \(2001\)](#):

$$T_H = 7200\alpha^{-0.002} \left(\frac{M_1}{M_\odot} \right)^{0.03} \left(\frac{R}{10^{10}} \right)^{-0.08} \text{ К} \quad (2.3)$$

Здесь α — стандартный параметр вязкости Шакуры–Сюняева.

Для диапазона температур $T > T_H$ спектральная полоса K ($\lambda \approx 2.2$ мкм) почти полностью лежит в области Рэлея–Джинса спектра черного тела, из чего следует, что поверхностная яркость в зависимости от температуры должна меняться как $S_K \propto T^{\approx 1}$. Поскольку температура внешних областей аккреционного диска в основном определяется облучением, она меняется как $T_{\text{out}} \propto L_X^{1/4} R_{\text{out}}^{-1/2}$ (см. Формулу 2.2) Учитывая, что $R_{\text{out}} \propto a$ и $a \propto P^{2/3}$ (из закона Кеплера), а $L_K \propto S_K R_{\text{out}}^2$, полная светимость аккреционного диска в ИК диапазоне должна быть пропорциональна $L_K \propto L_X^{0.25} P^1$.

Следует отметить, что указанные соотношения являются упрощенными — например, вязкий нагрев вещества в диске или вклад в светимость звезды-компаньона могут значительно их изменить. Чтобы лучше понимать соотношение между абсолютной звездной величиной в ближнем ИК диапазоне, рентгеновской светимостью и размером аккреционного диска (т.е. орбитальным периодом), мы рассчитали набор моделей LMXB для диапазона орбитальных периодов 2–750 ч и рентгеновских светимостей $1 \times 10^{35}\text{--}4 \times 10^{38}$ эрг с⁻¹.

Варьируя орбитальный период, мы полагаем, что звезда-компаньон заполняет свою полость Роша. Мы также полагаем, что при орбитальном периоде меньше ~ 6 ч ($M < 0.6 M_\odot$) звезда-донор является непроэволюционировавшей и поэтому соблюдает соотношение масса–радиус для звезды главной последовательности [Tout et al. \(1996\)](#). Для орбитального периода больше, чем ~ 6 ч (т.е. для компаньона-гиганта) мы фиксируем массу компаньона на значении $0.6 M_\odot$. Это упрощение на самом деле не очень сильно влияет на наши результаты и, кроме того, оно находит наблюдательное подтверждение в системах, для которых известна масса звезды-донора, поскольку она не превышает этого значения: например, в Sco X–1 $M_2 \sim 0.4 M_\odot$ ([Steehgs & Casares, 2002](#)), в Cyg X–2 $M_2 \sim 0.6 M_\odot$ ([Orosz & Kuulkers, 1999](#)).

После того как зафиксирован радиус аккреционного диска (на значении приливного радиуса в нашей модели) и его форма (показатель n в законе $H \propto R^n$), главный параметр, влияющий на корреляцию — это наклонение плоскости орбиты двойной системы (этот эффект проиллюстрирован на Рис. 2.9). Дополнительный сдвиг вдоль оси Y связан с выбором значения параметра для доли излучения, перерабатываемого в системе аккреционный диск – корона. В нашей модели мы используем значение 0.25, как обсуждалось выше.

Из всех моделей, покрывающих пространство параметров, которое обсуждалось выше, мы отобрали только те, которые дают температуру на внешней границе аккреционного диска не ниже $T_H \approx 6500$ К (см. Формулу 2.3). Это условие добавлено исходя из того, что мы ограничиваемся рассмотрением лишь постоянных LMXB, тогда как LMXB с более

низкими температурами на внешней границе диска подвержены вязко-тепловой неустойчивости (см., например, обзор [Lasota 2001](#)).

Полученные модельные абсолютные звездные величины в ближнем ИК диапазоне были аппроксимированы линейной комбинацией параметров $\log P$ и $\log L_X$. Мы минимизировали среднеквадратичное отклонение от модельных значений M_K . Наилучшая аппроксимация для LMXB с наклоном плоскости орбиты $i = 0^\circ$ имеет виде $M_{K,\text{model},i=0} = 2.62 - 0.73 \log(L_X/L_{\text{Edd}}) - 2.29 \log P()$; с наклоном $i = 70^\circ$: $M_{K,\text{model},i=70} = 3.71 - 0.70 \log(L_X/L_{\text{Edd}}) - 2.32 \log P()$. В обоих случаях среднеквадратичное отклонение данных от наилучшей модели составляет ~ 0.03 . Значение эддингтоновской светимости для нейтронной звезды с массой $1.4 M_\odot$ при этом принято равным $L_{\text{Edd}} = 2 \times 10^{38} \text{ эрг с}^{-1}$.

Вслед за [van Paradijs & McClintock \(1994\)](#) мы вводим величину Σ_K таким образом, чтобы она была пропорциональна светимости двойной системы в ближнем ИК диапазоне L_K (но не ее абсолютной звездной величине $M_K = -2.5 \log L_K + \text{const}$). Взяв средние значения наилучших коэффициентов из аппроксимаций, описанных выше, мы получим Σ_K для полосы K в ближнем ИК диапазоне: $\Sigma_K = (L_X/L_{\text{Edd}})^{0.29} P^{0.92}$. Для этой параметризации выполняется соотношение $M_K = -2.5 \log \Sigma_K + \text{const}$. Заметим, что полученные из наилучшей аппроксимации коэффициенты достаточно хорошо соответствуют простым теоретическим ожиданиям, которые обсуждались выше.

2.2.3.2 Выборка известных LMXB

Имея физически мотивированное определение параметра Σ_K , от которого зависит ИК светимость LMXB, мы построили соотношение $\log \Sigma_K - M_K$ для набора известных LMXB с существующими измерениями яркости в ИК диапазоне.

Мы скомпилировали выборку всех известных LMXB с измеренными звездными величинами в фильтре K (см. Таблицу 2.6). В выборку вошли только LMXB с нейтронными звездами, чтобы уменьшить разброс, связанный с неопределенностью массы компактного объекта.

Соотношение между абсолютной звездной величиной в полосе K и $\log \Sigma_K$ для известных двойных систем из Таблицы 2.6 представлено на Рис. 2.10.

Мы использовали линейный метод наименьших квадратов для аппроксимации этой зависимости, при этом не учитывались ошибки измерений из-за физического разброса абсолютной звездной величины, вызванного неизвестными наклонами орбит двойных систем.

Наилучшая аппроксимация для наблюдаемых LMXB таким образом имеет вид $M_K = (2.78 \pm 0.24) - (2.60 \pm 0.11) \log \Sigma_K$ (указаны 1σ доверительные интервалы). Для оценки доверительных интервалов (здесь и ниже) мы приняли неопределенность каждой точки в данных равной такому значению, чтобы результирующая нормированная сумма квадратов невязок $\chi^2/\text{d.o.f}$ стала равной единице. Доверительные интервалы затем рассчитывались обычным способом из интервалов параметров, дающих изменение суммы квадратов $\Delta\chi^2 = 1$.

Заметим, что если наша параметризация соотношения выбрана правильно, то коэффициент перед $\log \Sigma_K$ должен быть равен 2.5 (поскольку по построению величина Σ_K пропорциональна светимости L_K системы, связанной с абсолютной звездной величиной очевидным соотношением $M_K = -2.5 \log L_K + \text{const}$), что согласуется с результатами нашей аппроксимации. Зафиксировав коэффициент, мы получим:

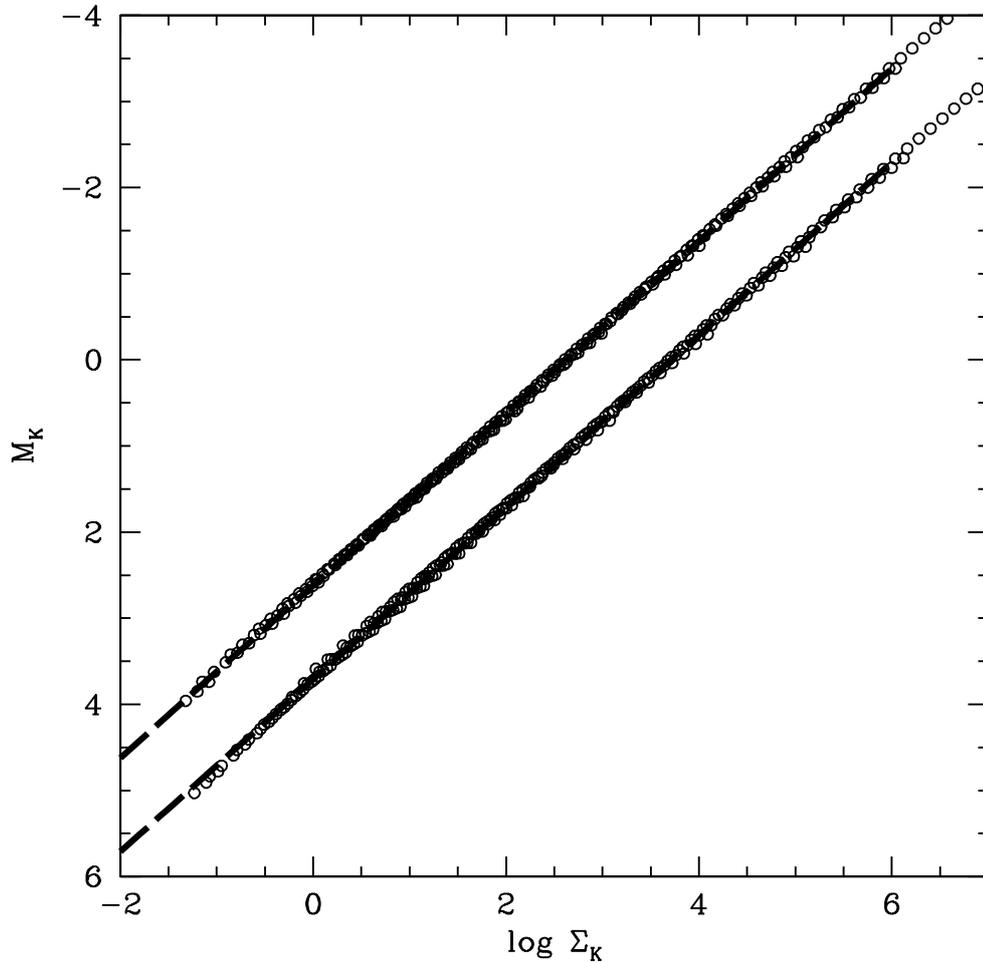


Рис. 2.9: Зависимость абсолютной звездной величины в ближнем ИК диапазоне для набора модельных LMXB от их орбитального периода и рентгеновской светимости, объединенных в величину Σ_K . Верхняя последовательность точек соответствует двойным системам с наклоном орбитальной плоскости к лучу зрения $i = 0^\circ$, в этом случае $\Sigma_K = (L_X/L_{\text{Edd}})^{0.29} P^{0.92}$. Нижняя последовательность точек соответствует наклону $i = 70^\circ$, при этом $\Sigma_K = (L_X/L_{\text{Edd}})^{0.28} P^{0.93}$. Пунктирные линии представляют наилучшую линейную аппроксимацию данных.

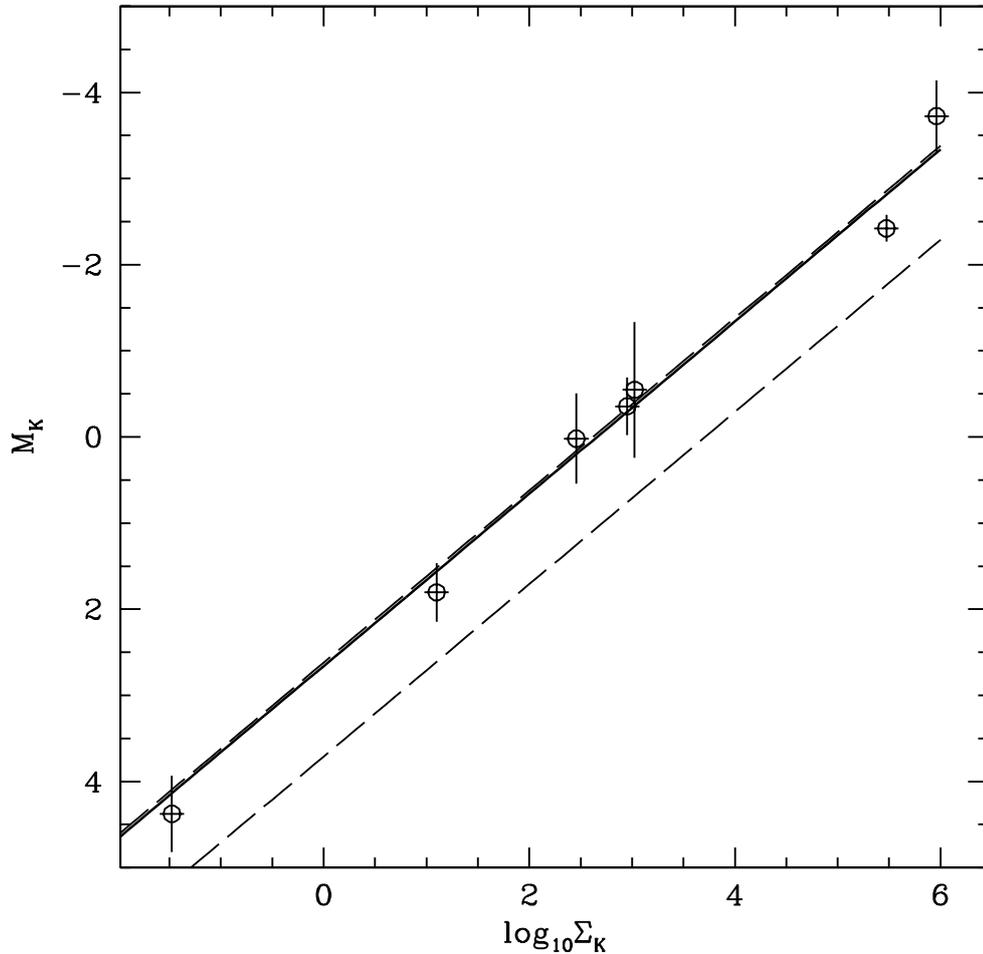


Рис. 2.10: Корреляция между абсолютной звездной величиной в ближнем ИК диапазоне и комбинацией рентгеновской светимости с орбитальным периодом $\Sigma_K = (L_X/L_{\text{Edd}})^{0.29} P^{0.92}$ для постоянных LMXB. Крестами показаны положения известных постоянных LMXB, пунктирные линии обозначают наилучшие линейные аппроксимации корреляций, полученных из моделирования LMXB: нижняя линия — для наклона орбитальной плоскости двойной системы к лучу зрения $i = 70^\circ$, верхняя линия — для $i = 0^\circ$. Сплошная линия показывает соотношение $M_K = 2.66 - 2.5 \log \Sigma_K$.

Таблица 2.6: Постоянные LMXB, представленные для иллюстрации $\Sigma_K - M_K$ корреляции на Рис. 2.10. Где это необходимо, приводятся ссылки на литературу. Рентгеновская светимость L_X взята из [Revnivtsev et al. \(2011\)](#), где она рассчитывается на основании рентгеновского потока из каталога *Uhuru* [Forman et al. \(1978\)](#) и оценок расстояния из литературы; орбитальные периоды P взяты из [Ritter & Kolb \(2003\)](#). Значения межзвездного поглощения A_K для 3 источников, для которых в настоящем разделе выполнен детальный анализ SED, вычислены из значения поглощения A_V в предположении $A_K = 0.11A_V$. Значения A_K для остальных источников взяты из трехмерной карты поглощения в Галактике [Marshall et al. \(2006\)](#), если не указано иное. Звездная величина 4U0614+091 в фильтре K была рассчитана из величины в фильтре J , измеренной [Migliari et al. \(2010\)](#), в предположении цвета $J - K$, соответствующего описываемой модели ИК излучения LMXB (см. детали в тексте).

Система	$\log L_X$ (2–10 кэВ) эрг с ⁻¹	d кпк	P ч	m_K^{corr} Вега	A_K зв. вел.
Sco X-1	38.3	2.8 ± 0.3^1	18.94	11.88	0.1
Cyg X-2	38.3	11.6 ± 0.3^2	236.27	12.9	0.15
GX 349+2	38.2	8.5^3	22.5	14.1^4	0.45
GX 13+1	37.7	7 ± 1^5	601.7	10.5^6	1.8^7
4U1624-49	37.5	15.0 ± 2.9^8	20.9	15.9^9	2.4
4U1735-44	37.7	9.1^{10}	4.65	16.6^{89}	0.16
4U1636-53	37.4	5.9	3.79	15.9^{11}	0.27^{11}
4U0614+091	36.5	3.2	0.81	16.9	0.22

(1) – [Bradshaw et al. \(1999\)](#), (2) – [Smale \(1998\)](#), (3) – расстояние до центра Галактики, (4) – [Wachter & Margon \(1996\)](#), (5) – [Bandyopadhyay et al. \(1999\)](#), (6) – [Bandyopadhyay et al. \(2002\)](#), (7) – [Charles & Naylor \(1992\)](#), (8) – [Xiang et al. \(2007\)](#), (9) – [Wachter et al. \(2005\)](#), (10) – [Augusteijn et al. \(1998\)](#), (11) – [Russell et al. \(2012\)](#)

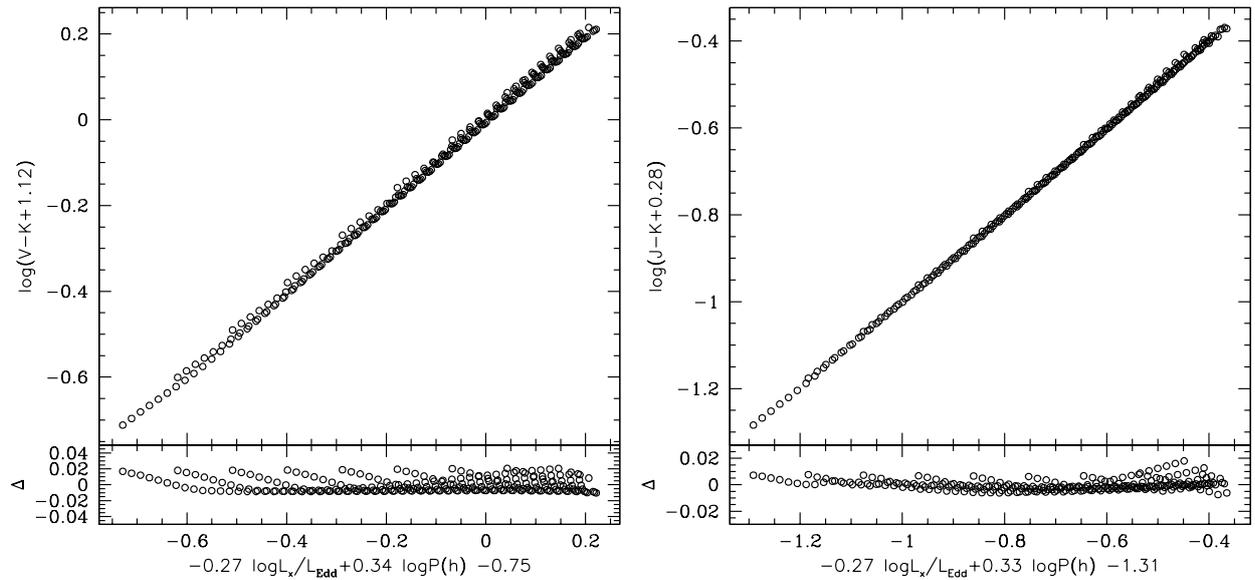


Рис. 2.11: Аппроксимации цветов LMXB моделью, описанной в тексте. Левая диаграмма показывает цвет $V - K$, правая — цвет $J - K$. На нижней панели для каждого графика представлены невязки модельной аппроксимации.

$$M_K = (2.66 \pm 0.11) - 2.5 \log \Sigma_K$$

Среднеквадратичное отклонение наблюдаемых значений звездной величины от наилучшей линейной аппроксимации в нашей выборке источников составляет ~ 0.3 зв. величины. Отметим, что эта величина примерно соответствует нижнему пределу для любой модели ИК потока LMXB $M_K = f(L_X, P)$, не учитывающей наклонение орбиты системы и изменение потока во времени.

В качестве полезного практического приложения приведем аппроксимации цветов $V - K$ и $J - K$, вычисленные при помощи нашей модели, как функцию $P()$ и L_X для наклонения плоскости орбиты $i = 0^\circ$. Наилучшая аппроксимация была получена минимизацией среднеквадратичной невязки в логарифмическом масштабе:

$$\log(V - K + 1.12) = -0.27 \log L_X/L_{\text{Edd}} + 0.34 \log P() - 0.75$$

$$\log(J - K + 0.28) = -0.27 \log L_X/L_{\text{Edd}} + 0.33 \log P() - 1.31$$

Невязки этих аппроксимаций в основном не превышают 0.02–0.04 в логарифмическом масштабе (см. Рис. 2.11).

2.2.4 Резюме

В данном разделе мы изучали соотношения между рентгеновской светимостью, орбитальным периодом и абсолютной звездной величиной в ближнем инфракрасном диапазоне маломассивных рентгеновских двойных с постоянной светимостью.

Мы показали, что распределение энергии в спектре LMXB в оптическом и ближнем ИК диапазонах часто может быть адекватно описано простой моделью, в которой все элементы

поверхности системы (а именно аккреционный диск и поверхность звезды-донора) излучают чернотельное излучение с локальной температурой, определяемой в свою очередь падающим рентгеновским потоком. В соответствии с этой моделью мы вводим величину $\Sigma_K = (L_X/L_{\text{Edd}})^{0.29} P()^{0.92}$, которая почти полностью определяет инфракрасную светимость LMXB. Таким образом, мы смогли сформулировать простое соотношение между Σ_K и абсолютной звездной величиной в K полосе M_K :

$$M_K = (2.66 \pm 0.11) - 2.5 \log \Sigma_K$$

Вследствие того, что для большинства постоянных LMXB существуют оценки их рентгеновской светимости, основная суть этого соотношения заключается в том, что оно связывает орбитальный период с абсолютной звездной величиной двойной системы, по сути являясь соотношением период–светимость в ближнем ИК диапазоне.

Однако в некоторых случаях наблюдается существенный избыток ближнего ИК излучения по отношению к предсказанному моделью уровню, что указывает на присутствие дополнительной спектральной компоненты (вероятно оптически тонкого синхротронного излучения, связанного с нетепловыми электронами). Мы поэтому рекомендуем проверять цвета LMXB в ближнем ИК диапазоне, сравнивая их с ожидаемыми значениями по формулам, приведенным выше, для адекватного применения представленного $\Sigma_K - M_K$ соотношения. Избыточно красный показатель цвета не согласуется с цветом оптически толстых областей в двойных системах, рассматриваемых в настоящем разделе.

Мы считаем, что предлагаемое соотношение период–величина имеет большие перспективы для применения в грядущих обзорах Галактики в ближнем ИК и рентгеновском диапазонах.

2.3 Постоянные рентгеновские источники в балдже Галактики. Физические ограничения из Виртуальной Обсерватории. Выборка I

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работе Zolotukhin & Revnivtsev (2011).

В данном разделе представлены наблюдения в оптическом и ближнем ИК диапазонах 6 маломассивных рентгеновских двойных, расположенных в балдже Галактики. Мы обработали несколько недавних наблюдений на обсерваториях *Chandra* и *XMM-Newton*, а также *Einstein*, целью которых был поиск ультракомпактных рентгеновских двойных систем, получив из них рентгеновские координаты источников с точностью порядка угловой секунды. Далее мы предприняли всесторонний поиск неопубликованных оптических и ИК наблюдений этих объектов в архивах астрономических данных и других ресурсах Виртуальной Обсерватории. Мы обнаружили и проанализировали данные из архива ESO и глубокого обзора неба инфракрасного телескопа UKIRT (UKIRT Infrared Deep Sky Survey, UKIDSS) по источникам SLX 1735–269, 3A 1742–294, SLX 1744–299, SLX 1744–300, GX 3+1, IGR J17505–2644 и представляем здесь их поисковые карты и фотометрические свойства вместе с простыми оценками физических параметров.

2.3.1 Используемые данные

2.3.1.1 Рентгеновский диапазон

Исследуемая нами выборка LMXB взята из обзора всего неба обсерватории *INTEGRAL* (Krivonos et al., 2007). Мы ограничились объектами из области балджа Галактики, про которые известно, что они не являются ни активными ядрами галактик (active galactic nuclei, AGN), ни массивными рентгеновскими двойными (high-mass X-ray binary, HMXB) (Revnivtsev et al., 2008). Точные астрометрические положения для части источников из выборки были получены из архивных наблюдений обсерватории *Chandra*, либо из целенаправленных наблюдений на *Chandra*, выполненных в 2009 году (руководитель программы М. Ревнивцев). Во всех кроме одного проанализированных наблюдениях *Chandra* астрометрическая точность положений источников определялась на прямых изображениях. Положения объектов были измерены программой WAVDETECT из пакета CIAO 4.2 и имеют 90% уровень значимости. Положение источника GX 3+1 было определено из наблюдения, выполненного в режиме непрерывного считывания (Continuous-Clocking mode) телескопа *Chandra* (наблюдение ID 2745), поэтому эффективно для определения положения с достаточной точностью была доступна лишь одна координата. Положение этого источника было дополнительным образом ограничено из архивного наблюдения на инструменте *Einstein*/HRI в режиме изображения.

2.3.1.2 Оптический и ближний ИК диапазоны

Мы проверили две известных коллекции астрономических данных, архив ESO² и архив WFCAM³, на наличие оптических и ИК данных для объектов, представляющих интерес для нашего исследования. Далее мы применили немного разные последовательности обработки этих данных в соответствии с их особенностями.

Несмотря на трудности с калибровочными данными, часто сопутствующими правильной редукции наблюдений из архива ESO, мы скрупулезно проделали обработку сырых данных (как научных кадров, так и стандартов Ландольта), при помощи программного пакета IRAF CCDPROC. Затем мы проделали апертурные фотометрические измерения кадров стандартных звезд и фотометрические измерения с учетом PSF научных кадров с программным пакетом IRAF DAOPHOT, приведя таким образом инструментальные звездные величины в стандартную систему звездных величин Веги.

Научный архив WFCAM использовался для скачивания готовых для научного анализа изображений в фильтрах *JHK* из обзора плоскости Галактики (Galactic Plane Survey, GPS), являющегося частью глубокого инфракрасного обзора неба (UKIRT Infrared Deep Sky Survey, UKIDSS) (Lawrence et al., 2007), релиз данных 3. Во избежание артефактов ПЗС изображений все отсчеты на кадрах были суммированы в окне 2×2 пикселя, что дало масштаб изображения $0.4''$ пикс⁻¹. Для поиска в этих данных ИК двойников LMXB с максимальной чувствительностью мы решили применять такую же, как для ESO данных, процедуру фотометрических измерений. Калибровочные соотношения в этом случае были построены путем сравнения наших апертурных измерений радиусом $2''$ со звездными величинами в фильтрах *JHK* из UKIDSS в тех же апертурах (**AperMag3* в терминах колонок в базе данных UKIDSS), что дало нам преобразование инструментальных звездных

²<http://archive.eso.org>

³<http://surveys.roe.ac.uk/wsa/>

величин в систему UKIDSS, т.е. в систему Веги как и с данными ESO.

Там, где в тексте ниже упоминаются верхние пределы фотометрических измерений, они определялись как звездные величины самых слабых объектов, обнаруженных нашим алгоритмом на уровне значимости 3σ над фоном изображения.

Поскольку данные ESO чаще всего не имеют астрометрической калибровки, мы разработали для этого собственную процедуру на основе программы SCAMP (Bertin, 2006). В данных UKIDSS мы использовали существующее астрометрическое решение, считая его точным на уровне 100 миллисекунд дуги по каждой координате по отношению к системе координат 2MASS (см., например, Deacon et al., 2009), которая в свою очередь привязана с точностью 100 миллисекунд дуги к международной системе небесных координат (International Celestial Reference System, ICRS) (Skrutskie et al., 2006). Неопределенности координат в данном разделе, таким образом, содержат не только нашу оценку точности определения положения, но и неопределенность системы координат, которая использовалась в каждом конкретном случае. Для более прозрачного сравнения с рентгеновскими наблюдениями повсюду под астрометрической неопределенностью понимается радиус кружка ошибок, если не оговорено иное.

2.3.2 Наблюдения и результаты

2.3.2.1 SLX 1735–269

Источник SLX 1735–269 исследовался в работе Wilson et al. (2003), где были проведены наблюдения на *Chandra* и получены его координаты на уровне точности порядка угловой секунды. В этой работе впервые была предпринята попытка обнаружить двойник источника в ближнем ИК диапазоне для чего были проведены специальные наблюдения на телескопе UKIRT. Однако ничего не было обнаружено до предельной звездной величины 19.4 в фильтре *J*.

В настоящей работе мы проанализировали изображения SLX 1735–269 в фильтрах *R* и *I* из архива ESO, полученные в рамках программы ID 67.D-0116(A). Наблюдение включало в себя 900 с экспозиции для каждого из двух фильтров, полученные 28 мая 2001 года между 08:22 UT и 08:58 UT при помощи детектора EMMI на 3.6-м телескопе NTT. На изображении в фильтре *R* отчетливо виден единственный объект внутри неопределенности координат *Chandra* из работы Wilson et al. (2003) (см. Рис. 2.12), он также присутствует на уровне 3σ в изображении в фильтре *I*. Мы оценили звездную величину этого позиционного кандидата: $R = 21.31 \pm 0.12$; $I = 20.10 \pm 0.07$. Астрометрическая привязка была получена в системе координат 2MASS и имеет точность $0.15''$ (см. Таблицу 2.7). Отметим однако, что мы не можем исключить, что измеренный оптический объект представляет собой бленду из двух источников и этот факт может повлиять на нашу оценку координат и звездной величины.

Рентгеновские вспышки SLX 1735–269 тщательно исследовались в работе Molkov et al. (2005), где было подтверждено расстояние до двойной системы в 8.5 кпк. Вкупе с оценкой поглощения на луче зрения из Marshall et al. (2006) ($A_K \simeq 0.5$ зв. вел.), принимая нормальный закон поглощения Cardelli et al. (1989), мы получаем верхний предел (здесь имеется в виду отсутствие окончательной определенности при отождествлении объекта по координатам) на абсолютную звездную величину системы в фильтре *R* и *I*: $M_R \gtrsim 3.4$ зв. вел. и $M_I \gtrsim 3.4$ зв. вел.

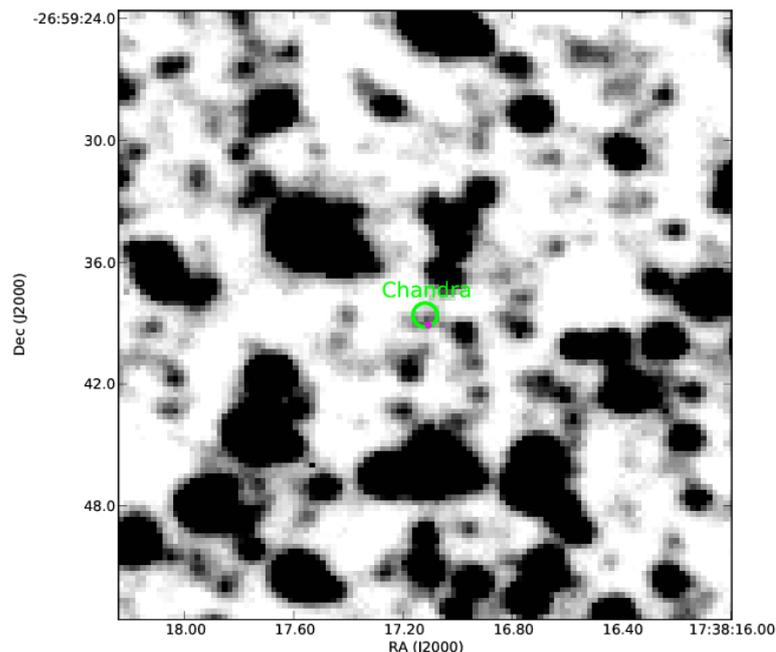


Рис. 2.12: Изображение поля SLX 1735–269 в фильтре R , полученное с экспозицией 900 с на детекторе ЕММІ 3.6-м телескопа NTT. Зеленый кружок обозначает неопределенность координат *Chandra* из работы [Wilson et al. \(2003\)](#), пурпурный кружок показывает положение предполагаемого позиционного кандидата (см. текст).

2.3.2.2 3A 1742–294

Источник 3A 1742–294 (также обозначается как 1A 1742–294 или 2E 1742.9–2929) представляет собой рентгеновскую двойную систему с постоянной светимостью, демонстрирующую рентгеновские вспышки I типа. Впервые его поисковая карта в оптическом диапазоне была опубликована [Jernigan et al. \(1978\)](#), но точность рентгеновских координат в то время не позволила произвести однозначное отождествление. [Wijnands et al. \(2006a\)](#) определили при помощи *Chandra* рентгеновское положение источника с точностью порядка угловой секунды, но с тех пор не было предпринято попыток исследовать новый кружок ошибки в оптическом / ближнем ИК диапазоне.

Мы проанализировали поле вокруг координат 3A 1742–294 в изображениях из обзора UKIDSS GPS DR3, полученных на 3.8-м телескопе UKIRT 18 июля 2006 года в 09:30 с временем накопления 10 с (фильтр J), в 09:38 с временем накопления 10 с (фильтр H), и в 09:45 с временем накопления 5 с (фильтр K). Нам не удалось обнаружить никакого объекта внутри неопределенности рентгеновского положения из [Wijnands et al. \(2006a\)](#), поэтому мы приводим лишь верхний предел на звездную величину 3A 1742–294 в ближнем ИК диапазоне (см. Таблицу 2.7). Отметим все же, что к юго-востоку немного снаружи от формального кружка ошибок *Chandra* находится блендированный объект с 2 компонентами (см. Рис. 2.13), каждая из которых может оказаться двойником объекта. Наша процедура фотометрических измерений с PSF не смогла разделить эту бленду на компоненты, а измеренные координаты бленды лежат снаружи области неопределенности рентгеновских координат.

[Galloway et al. \(2008\)](#) оценили расстояние до 3A 1742–294 из рентгеновских вспышек

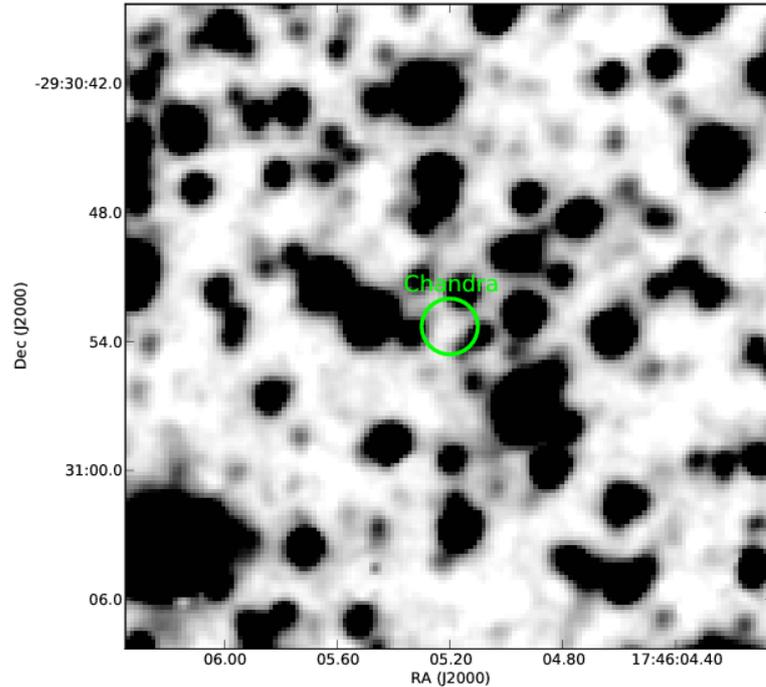


Рис. 2.13: Изображение поля 3A 1742–294 в фильтре K из обзора UKIDSS GPS DR3. Кружок ошибки положения с *Chandra* из работы [Wijnands et al. \(2006a\)](#) не содержит объектов.

с расширением фотометрического радиуса в 5.8–7.5 кпк. Принимая $d = 6$ кпк и соответствующее расстоянию поглощение $A_K \simeq 2.0$ зв. вел. из [Marshall et al. \(2006\)](#), измеренный верхний предел на наблюдаемую звездную величину соответствует абсолютной звездной величине 3A 1742–294: $M_K \gtrsim 2.0$ зв. вел.

2.3.2.3 SLX 1744–299

Источник SLX 1744–299 является южным компонентом тесной пары рентгеновских источников SLX 1744–299/300 (угловое расстояние $\sim 2.5'$), открытой в области центра Галактики экспериментом *Spartan1* ([Kawai et al., 1988](#)) и разрешенной рентгеновскими телескопами *Spacelab* ([Skinner et al., 1987, 1990](#)), *MIR-KVANT-TTM* и *GRANAT/ART-P* ([Siuniaev et al., 1991](#)). Оба источника являются вспыхивающими рентгеновскими объектами ([Skinner et al., 1990](#); [Siuniaev et al., 1991](#)).

Положение SLX 1744–299 было определено по изображениям *Chandra*, полученным в рамках наблюдений ID 2834 (изображение на детекторе ACIS-I, 23 октября 2002 года) и 9106 (изображение на детекторе HRC-I, 7 февраля 2008 года). Источник слишком ярк для детектора ACIS-I, поэтому его изображение страдает от сильного перенакопления, что проявляется в виде дыры вокруг положения объекта. Мы использовали пересечение этой дыры с полосой от считывания яркого объекта, хорошо заметной на изображении, для определения координат источника: RA=17:47:25.88, Dec=-30:00:02.0 (J2000). В поле зрения отсутствуют другие рентгеновские источники, поэтому нет возможности улучшить качество астрометрической привязки через отождествление рентгеновских объектов с оптическими каталогами. Неопределенность нашей оценки рентгеновских координат в основном определяется точностью астрометрического решения *Chandra* по умолчанию, мы

полагаем его равным $\sim 0.6''$. Второе наблюдение *Chandra* выполнено с детектором HRC-I и не испорчено перенакоплением. Мы измерили положение объекта с помощью программы WAVDETECT пакета CIAO 4.0. Поскольку в этом наблюдении источник находился довольно далеко от оптической оси телескопа ($\sim 3'$), точность определения его положения была хуже обычной. В исследовании астрометрической точности *Chandra* Alexander et al. (2003), точность положений объектов на таком расстоянии от центра поля зрения составляет порядка $\sim 0.4''$, если проводится привязка к оптическим объектам. В ее отсутствие мы квадратично добавили $0.6''$ к полученной нами неопределенности, получив таким образом точность $\sim 0.7''$.

Мы проанализировали изображение поля SLX 1744–299 в фильтре *I*, доступное в архиве ESO с идентификатором программы ID 079.D-0385(C). Наблюдение содержит 6 экспозиций по 600 с накопления каждая, полученных 23 июня 2007 года между 06:27 и 07:36 UT на детекторе EMMI 3.6-м телескопа NTT. Первые три изображения центрированы на SLX 1744–299, оставшиеся три — на SLX 1744–300, при этом координаты обоих источников всегда попадают в изображение, т.к. их разделяет всего $2.7'$, что существенно меньше поля зрения EMMI. Условия наблюдений немного ухудшились во второй половине наблюдения, поэтому мы просуммировали первые три экспозиции, получив полное время накопления 1800 с. Единственный источник отчетливо виден внутри кружка ошибок *Chandra* на суммарном изображении (см. Рис. 2.14, левая панель), хотя мы должны отметить, что профиль его яркости острее, чем у других объектов на изображении. С другой стороны он детектируется на пределе в индивидуальных изображениях, поэтому мы не можем считать его артефактом, учитывая еще то, что мы аккуратно проверили все калибровочные кадры и не обнаружили особенностей, которые могли бы повлиять на профиль источника наблюдаемым образом. Фотометрические измерения с PSF этого позиционного кандидата дают звездную величину $I = 23.37 \pm 0.28$. Астрометрическая калибровка была выполнена с точностью $0.2''$ в системе координат GSC 2.2, точность которой составляет 170 миллисекунд дуги по обоим координатам (см., например, Fienga & Andrei, 2004).

Это поле также содержится в обзоре UKIDSS GPS DR3 (см. Рис. 2.14, правая панель). Изображения, полученные 3.8-м телескопом UKIRT 20 июля 2006 года между 09:16 и 09:30 UT (10 с экспозиция для фильтров *J* и *H*, и 5 с для фильтра *K*) не содержит ничего примечательного внутри кружка ошибок, попадающего мимо объектов в тесном поле. Из этого наблюдения, таким образом, мы приводим оценку верхнего предела на яркость объекта (см. Таблицу 2.7).

На каноническом расстоянии 8 кпк с таким же способом учета межзвездного поглощения, как и выше, мы оцениваем абсолютную звездную величину SLX 1744–299 в $M_I \gtrsim 2.2$.

2.3.2.4 SLX 1744–300

Северный компонент из пары рентгеновских барстеров SLX 1744–299/300.

Его положение было получено из наблюдения на *Chandra* по программе ID 9106 (изображение с детектором HRC-I). В этом наблюдении источник располагается довольно далеко от оптической оси телескопа ($\sim 5.4'$). На таком угловом расстоянии функция рассеяния точки существенно шире и, соответственно, заметно хуже точность локализации. Мы определили положение источника при помощи программы WAVDETECT из пакета CIAO 4.0. Центроид положения объекта имеет координаты: RA=17:47:26.02, Dec=-30:02:41.8 (J2000), неопределенность оценки мы оцениваем в $0.7''$.

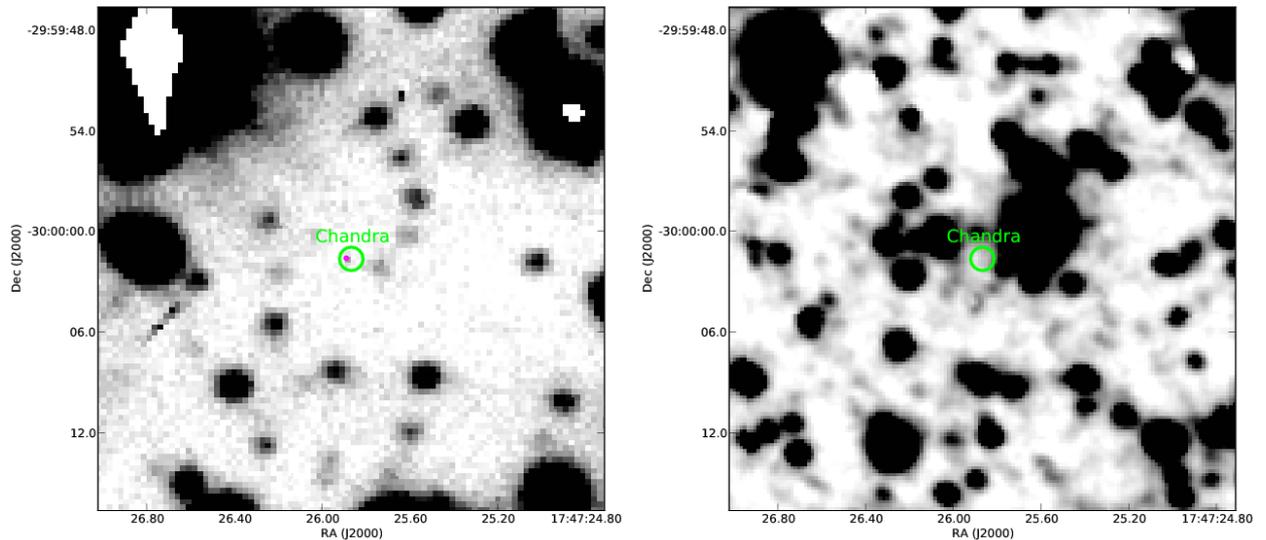


Рис. 2.14: Поле SLX 1744–299 с неопределенностью координат *Chandra*, показанной зеленым цветом. *Левая панель*: результирующее изображение в фильтре *I*, полученное суммированием трех индивидуальных изображений с экспозицией 600 с каждое из наблюдения с детектором EMMI на 3.6-м телескопе NTT. Пурпурный кружок показывает положение предполагаемого двойника. *Правая панель*: изображение в фильтре *K* из обзора UKIDSS GPS DR3. Область неопределенности рентгеновского положения не содержит объектов.

Для исследования SLX 1744–300 мы использовали те же самые наблюдения их архивов ESO и обзора UKIDSS, что и для SLX 1744–299. В данных ESO нам не удалось обнаружить оптический двойник вплоть до предельной звездной величины на уровне 3σ $I = 23.4$ (см. Рис. 2.15, левая панель). Наблюдение из обзора UKIDSS тоже не содержит ничего примечательного внутри кружка ошибки рентгеновского положения (хотя мы обнаружили объект с координатами RA=17:47:25.97, Dec=–30:02:41.1 (J2000) всего в $0.3''$ от границы кружка ошибки в фильтрах *H* и *K* со звездной величиной $H = 17.90 \pm 0.14$; $K = 16.75 \pm 0.14$), поэтому в Таблицу 2.7 с результатами мы включаем лишь верхний предел на светимость объекта.

На каноническом расстоянии 8 кпк с таким же способом учета межзвездного поглощения, как и выше, мы оцениваем абсолютную звездную величину SLX 1744–300 в $M_K \gtrsim 1.9$.

2.3.2.5 GX 3+1

GX 3+1 — это маломассивная рентгеновская двойная система известная своими рентгеновскими вспышками, как обычными (см., например, [Chenevez et al. \(2006a\)](#) и ссылки там), так и супер-вспышкой ([Kuulkers et al., 2002](#)). Среди всех зарегистрированных вспышек только одна имела признаки расширения фотосферного радиуса, именно ее использовали для оценки расстояния до источника $d \sim 4.5$ кпк ([Kuulkers & van der Klis, 2000](#)), полученного в предположении водородной атмосферы нейтронной звезды. Однако анализ других термоядерных вспышек GX 3+1 в работе [den Hartog et al. \(2003\)](#) указывает скорее на гелиевую атмосферу и следовательно чуть большее расстояние до системы $d = 6.1 \pm 0.1$ кпк, которое мы и будем использовать ниже. Первый поиск двойника GX 3+1 в ближнем ИК диапазоне был предпринят [Naylor et al. \(1991\)](#). В работе сообщается об обнаружении од-

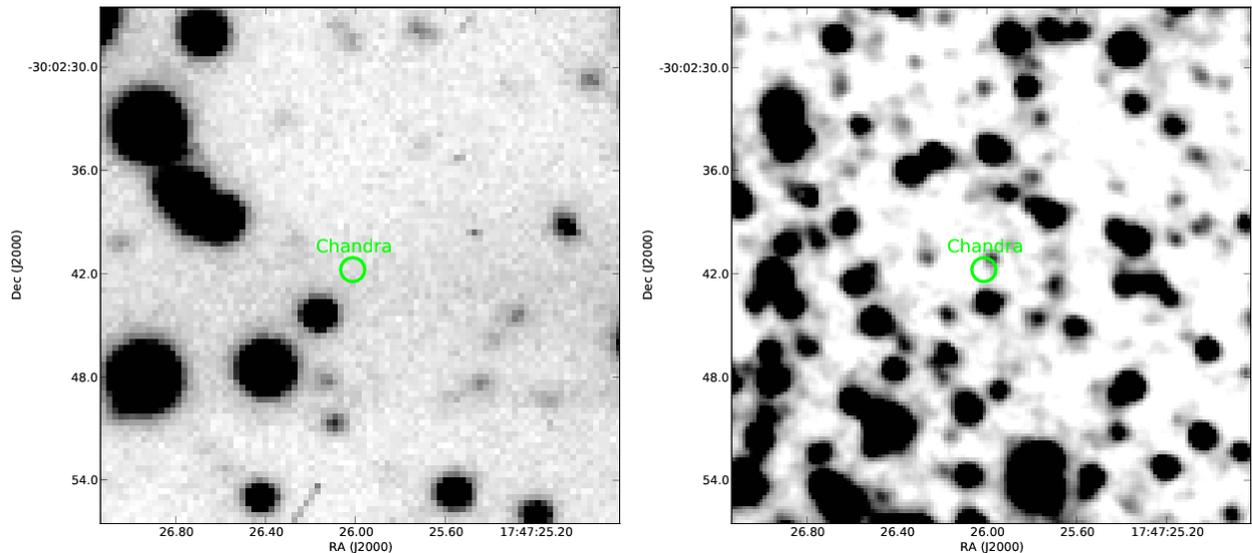


Рис. 2.15: Поле SLX 1744–300 с неопределенностью координат *Chandra*. *Левая панель*: результирующее изображение в фильтре *I*, полученное сложением трех индивидуальных экспозиций по 600 с каждая из наблюдения с детектором EMMI на 3.6-м телескопе NTT; внутри кружка неопределенности рентгеновских координат источник не обнаружено. *Правая панель*: изображение в фильтре *K* из обзора UKIDSS GPS DR3.

ного объекта внутри неопределенности координат, образованной пересечением неопределенностей положения из наблюдения на *Einstein* и наблюдения покрытия GX 3+1 Луной (см. ниже).

Мы получили астрометрическое положение источника из наблюдения на *Chandra* (программа ID 2745, выполнено 9 апреля 2002 года) и наблюдений на *Einstein*/HRI (выполнены 23 марта 1979 года и 28 марта 1980 года). Наблюдение на *Chandra* было выполнено в режиме непрерывного считывания (Continuous-Clocking mode), что затрудняет определение точного положения источника по одной из координат (большая ось эллипса ошибки положения *Chandra* на Рис. 2.16 выбрана произвольно, т.к. положение источника определено лишь по одной оси). Однако объединив положения из наблюдения с *Einstein*/HRI (наилучшая аппроксимация позиции: RA=17:47:56.11, Dec=-26:33:48.8 (J2000), точность $\sim 2''$) и на *Chandra*, мы можем немного улучшить результирующую неопределенность координат примерно до уровня прямоугольника размером $0.5 \times 2''$ (см. Рис. 2.16).

Мы исследовали объединенную неопределенность положения *Chandra* и *Einstein* в данных обзора UKIDSS GPS DR3 (см. Рис. 2.16). Из-за ее сравнительно большого размера в нее попадает 2 источника. На основании имеющейся информации невозможно выбрать какой-то один из них: необходимо получить либо более компактную неопределенность рентгеновских координат, либо провести наблюдения в ближнем ИК диапазоне, разрешающие орбитальный период двойной системы с целью поиска переменности в одном из объектов. Источник А из настоящей работы вероятно соответствует источнику 311 из работы [Naylor et al. \(1991\)](#). Результаты по GX 3+1 в Таблице 2.7 были получены из наблюдений, проведенных 3 мая 2007 года между 13:47 и 14:02 UT с обычными для UKIDSS временами накопления.

Для оценки ИК светимости GX 3+1 мы взяли более яркий из двух позиционных кан-

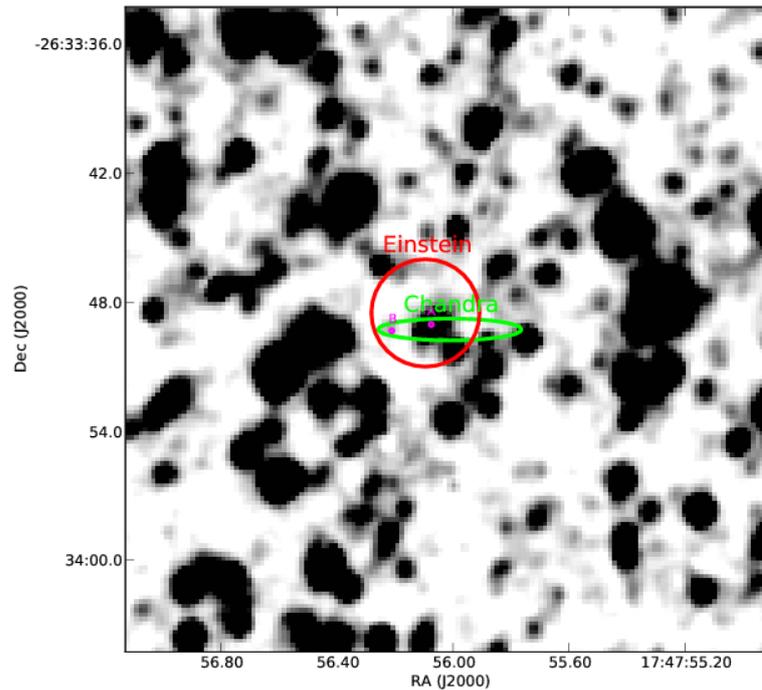


Рис. 2.16: Поле GX 3+1 в фильтре K по данным обзора UKIDSS GPS DR3, показаны неопределенности координат *Chandra* (зеленым цветом) и *Einstein* (красным цветом). Два позиционных кандидата в двойники, источники А и В, показаны пурпурными кружками.

дидатов и приводим таким образом верхний предел на абсолютную звездную величину для расстояния из [den Hartog et al. \(2003\)](#): $M_K \gtrsim 0.2$.

2.3.2.6 IGR J17505–2644

Источник IGR J17505–2644 является одной из самых слабых постоянных LMXB в области балджа Галактики. Он был обнаружен обсерваторией *INTEGRAL* ([Krivonos et al., 2007](#)) и предположительно классифицирован как LMXB в работе [Revnivtsev et al. \(2008\)](#).

Источник наблюдался на обсерватории *Chandra* 5 августа 2009 года в рамках специальной программы, посвященной определению астрометрических положений LMXB и кандидатов в LMXB в балдже Галактики. Внутри позиционной неопределенности *INTEGRAL* был обнаружен единственный сравнительно яркий объект. Его положение по данным *Chandra*: RA=17:50:39.49, Dec=-26:44:36.1 (J2000). Неопределенность положения составляет $0.6''$ и в основном определяется точностью астрометрической привязки *Chandra*, а не статистической ошибкой измерений.

Мы исследовали область неопределенности рентгеновских координат IGR J17505–2644 в данных обзора UKIDSS GPS DR3 (см. Рис. 2.17), полученных 3 мая 2007 года между 13:49 и 14:03 UT во время ночи хорошего качества (с качеством изображения $\sim 0.7''$). Нам не удалось ничего обнаружить внутри кружка ошибки рентгеновских координат в фильтрах J и H , но мы обнаружили на пределе слабый объект в фильтре K . Его звездную величину не удалось измерить путем аппроксимации профиля яркости функцией рассеяния точки по причине его слабости, поэтому мы приводим результаты апертурной фотометрии и астрометрическое положение его центра тяжести (центроида). Заметим, что

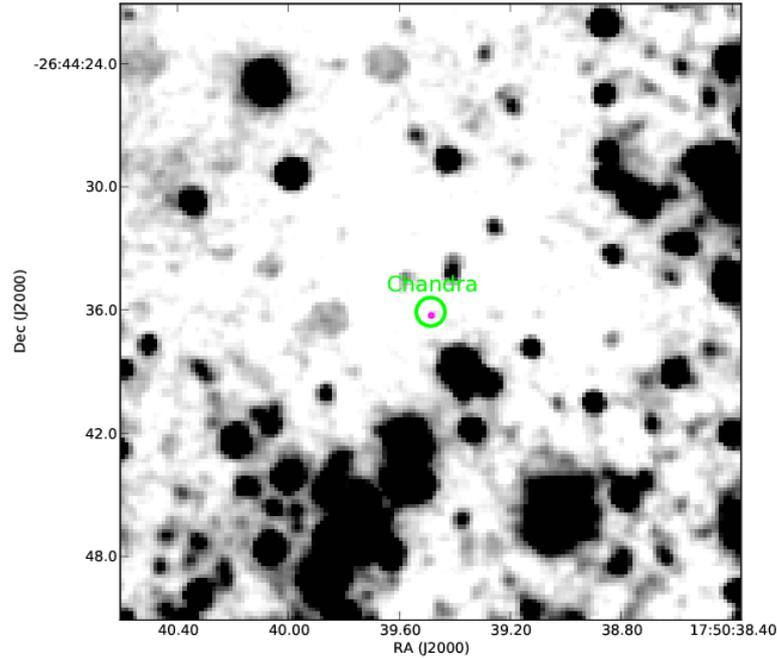


Рис. 2.17: Поле IGR J17505–2644 в фильтре K по данным обзора UKIDSS GPS DR3. Зеленым цветом показана неопределенность положения *Chandra*. Пурпурный кружок обозначает положение предполагаемого ИК двойника, видимого на пределе внутри кружка ошибки рентгеновского положения.

верхние пределы в фильтрах J и H существенно лучше обычных наблюдений из обзора UKIDSS по причине хорошего качества атмосферных условий.

Обнаружение возможного двойника IGR J17505–2644 в фильтре K позволяет оценить его абсолютную звездную величину: $M_K \gtrsim 2.2$.

2.3.3 Резюме

Мы провели систематический поиск в архивах ESO и WFCAM данных фотометрических наблюдений в областях вблизи положений 6 LMXB из области балджа Галактики. Во всех кроме двух случаях мы обнаружили внутри области ошибки рентгеновского положения секундного масштаба слабые оптические/ИК объекты с яркостью в диапазоне 15–23 зв. вел. Для оставшихся двух случаев мы получили верхние пределы на яркость оптического/ИК двойника. Мы подчеркиваем, что позиционное отождествление всегда обладает неоднозначностью, поэтому наши результаты следует принимать с осторожностью. Тем не менее, в них содержится важная информация о верхних пределах яркости в оптическом/ИК диапазоне настоящих двойников LMXB. Наши основные результаты представлены в Таблице 2.7. Для того, чтобы охарактеризовать локальную плотность звезд фона вблизи объектов, мы рассчитываем простую вероятность случайного попадания фоновой звезды в кружок ошибки рентгеновского положения по формуле: $P = S_{error} \times \rho$, где S_{error} — площадь кружка ошибки рентгеновского положения, а ρ — средняя поверхностная плотность обнаруженных в $2'$ от положения объекта фоновых источников. Таким образом, поскольку полная вероятность случайного попадания фоновой звезды в область неопределенности рентгеновского положения, суммированная по всем случаям, составляет 1.64, а мы обна-

Таблица 2.7: Сводная таблица полученных ограничений на светимость в оптическом и ближнем ИК диапазоне, ограничений на орбитальные периоды и данных о положении источников, исследуемых в данной главе. Звездные величины (как позиционных кандидатов, так и верхние пределы при отсутствии обнаружения) приведены в системе Веги. Ошибки положений возможных двойников LMXB, найденных в настоящей работе, представляют собой радиусы неопределенностей координат в угловых секундах по отношению к системе координат ICRS. Источники данных для неопределенностей координат указаны в примечаниях. Вероятности случайной проекции звезды фона приводятся для самого красного фильтра в случае отсутствия позиционного кандидата, или для самого красного фильтра, в котором обнаружено отождествление (см. детали в тексте). Абсолютные звездные величины вычислены для самого красного доступного фильтра с учетом поглощения из Marshall et al. (2006) и оценок расстояния из литературы (см. текст); мы считаем величины всегда верхними пределами из-за неоднозначности отождествления по координатам. Верхние пределы орбитальных периодов вычислены в часах при помощи соотношения van Paradijs & McClintock (1994) с использованием данных о рентгеновской светимости из литературы, приведенной в примечаниях.

Обознач.	RA (J2000)	Dec (J2000)	Позиц. ошиб.	Вероят-ть	Зв. вел.	Абс. зв. вел.	Период
SLX 1735–269							
src A	17:38:17.11	-26:59:39.1	0.2 ^a	0.07	$R = 21.31 \pm 0.12; I = 20.10 \pm 0.07$	$M_I \gtrsim 3.4$	$\lesssim 2.6^d$
3A 1742–294							
	17:46:05.20	-29:30:53.3	1.3 ^c	0.55	$J > 19.9; H > 18.6; K > 17.9$	$M_K \gtrsim 2.0$	$\lesssim 28^e$
SLX 1744–299							
src A	17:47:25.89	-30:00:01.6	0.4 ^a	0.17	$I = 23.37 \pm 0.28; J > 19.9; H > 18.7; K > 18.0$	$M_I \gtrsim 2.2$	$\lesssim 24^f$
SLX 1744–300							
	17:47:26.01	-30:02:41.8	0.7 ^b	0.17	$I > 23.4; J > 19.8; H > 18.8; K > 18.0$	$M_K \gtrsim 1.9$	$\lesssim 65^f$
GX 3+1							
src A	17:47:56.06	-26:33:48.9	0.2 ^a	0.55	$J = 16.43 \pm 0.11; H = 15.42 \pm 0.09; K = 14.87 \pm 0.13$	$M_K \gtrsim 0.2$	$\lesssim 14^g$
src B	17:47:56.21	-26:33:49.3	0.3 ^a	0.55	$J = 19.8 \pm 0.4; H = 18.4 \pm 0.3; K = 17.9 \pm 0.3$		
IGR J17505–2644							
src A	17:50:39.48	-26:44:36.3	0.3 ^a	0.13	$J > 20.3; H > 19.3; K = 18.5 \pm 0.4$	$M_K \gtrsim 2.2$	$\lesssim 390^h$

^a Из наблюдений в оптическом / ближнем ИК диапазоне в настоящей работе

^b Из рентгеновских наблюдений в настоящей работе

^c Из Wijnands et al. (2006a)

^d Используя L_X (0.5–100 кэВ) из Molkov et al. (2005) и формулу преобразования в 2–10 кэВ из Revnivtsev et al. (2008)

^e Используя L_X (2–10 кэВ) из Wijnands et al. (2006a)

^f Используя L_X (2–10 кэВ) из Sidoli et al. (1999)

^g В предположении, что L_X из Galloway et al. (2008) дана в диапазоне 2–10 кэВ (Revnivtsev et al., 2008)

^h Используя L_X (17–60 кэВ) из Revnivtsev et al. (2008) и формулу преобразования в 2–10 кэВ из этой же работы

ружили 5 возможных двойников для 4 объектов, мы заключаем, что два или три из них могут быть настоящими двойниками.

Предполагая, что значения оригинальных (до межзвездного поглощения) цветов LMXB с непроэволюционировавшими компаньонами составляют $(V - K)_0 \sim 0$ (см., например, Hertz & Grindlay (1984)) и, отчасти произвольно, но консервативно $(V - R)_0 \sim 0$ и $(V - I)_0 \sim 0$, мы оценили верхние пределы на орбитальные периоды исследованных систем (показаны в последней колонке Таблицы 2.7). Мы использовали соотношение van Paradijs & McClintock (1994) для оптической светимости, которая в основном определяется аккреционным диском, облученным центральным рентгеновским источником. Значение эддингтоновской светимости взято из работы Kuulkers et al. (2003). С этими предположениями мы находим, что (по крайней мере) одна из исследованных систем является довольно компактной и имеет орбитальный период меньше 3 часов.

2.4 Постоянные рентгеновские источники в балдже Галактики. Физические ограничения из Виртуальной Обсерватории. Выборка II

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работе *Zolotukhin & Revnivtsev (2015)*.

В данном разделе мы представляем архивные данные в ближнем и среднем ИК диапазонах по 7 постоянным рентгеновским источникам, расположенным в балдже Галактики, полученные в рамках глубокого обзора неба на телескопе UKIRT (UKIRT Infrared Deep Sky Survey, UKIDSS), обзора половины плоскости Галактики на обсерватории *Spitzer* (Galactic Legacy Infrared Mid-Plane Survey Extraordinaire, GLIMPSE) и обзора полного неба на обсерватории *WISE* (*Wide-field Infrared Survey Explorer*). Нам удалось успешно отождествить или получить верхние пределы на ИК поток для систем SAX J1747.0–2853, IGR J17464–2811, AX J1754.2–2754, IGR J17597–2201, IGR J18134–1636, IGR J18256–1035, Ser X–1 и тем самым ограничить физические параметры этих объектов. Для источника IGR J17597–2201 мы приводим аргументы, что он аккрецирует вещество звездного ветра компаньона, не заполняющего свою полость Роша. Мы считаем, что на рентгеновской светимости 10^{34-35} эрг с⁻¹ мы начинаем обнаруживать редкие маломассивные рентгеновские двойные, аккрецирующие звездный ветер компаньона.

2.4.1 Используемые данные

В данном разделе были использованы несколько коллекций данных из ближнего ИК диапазона. Доступ к ним осуществлялся через интерфейсы Виртуальной Обсерватории, а именно программу TOPCAT (*Taylor, 2005*) и веб-сервис CDS VIZIER ConeSearch для обзора GLIMPSE и каталога *WISE*, и веб-сайт научного архива WFCAM⁴ для данных обзора UKIDSS. Из нескольких обзоров, входящих в UKIDSS, мы использовали обзор плоскости Галактики (Galactic Plane Survey, GPS) и его релиз данных 7 (UKIDSS GPS DR7), а в случае Ser X–1 также релиз данных 9.

Вместо использования готового каталога мы разработали программы для собственной обработки и анализа изображений обзора UKIDSS с целью обнаружить и измерить более слабые объекты, которые не были включены в публично доступный каталог UKIDSS. Мы считаем возможными ИК двойниками объекты, которые попадают внутрь 1σ неопределенности рентгеновского положения. Мы провели фотометрические PSF измерения изображений размером $2'$ на $2'$ научных кадров UKIDSS при помощи программного пакета IRAF DAOPHOT. Калибровка инструментальных звездных величин была сделана путем сравнения результатов фотометрии в апертуре $2''$ со звездными величинами из каталога UKIDSS, измеренными в той же апертуре. Мы использовали это калибровочное соотношение для перевода PSF звездных величин в фотометрическую систему UKIDSS, т.е. в систему Веги. В результате нашего анализа мы смогли обнаружить и измерить яркость звезд в среднем на 1 звездную величину слабее, чем предел каталога UKIDSS. Предельная звездная величина на изображениях UKIDSS определялась как звездная величина объектов, обнаруживаемых на уровне 3σ над фоном. Астрометрическая калибровка в на-

⁴<http://surveys.roe.ac.uk/wsa/>

шем анализе основана на астрометрическом решении UKIDSS, содержащимся в каждом файле с изображением. Неопределенности астрометрических положений в данном разделе включают систематическую ошибку астрометрической системы UKIDSS по отношению к международной системе небесных координат ICRS. Чуть более детально фотометрические и астрометрические процедуры описаны в предыдущем Разделе 2.3.

Данные GLIMPSE были взяты из официального релиза каталога, к которому мы обращались через веб-сервис CDS VIZIER. При работе с данными GLIMPSE мы принимали во внимание погрешность его астрометрической привязки $0.3''$ по каждой координате. К данным каталога *WISE* мы также обращались через веб-сервис CDS VIZIER. Астрометрическая погрешность каталога *WISE* $0.4''$ по каждой координате. Мы приводим все использованные обзоры и фильтры в Таблице 2.8.

Для каждого поля мы вычислили вероятность случайной проекции звезды фона на область 1σ неопределенности рентгеновского положения. По сути, она характеризует локальную плотность звезд фона на изображении в фильтре K вблизи рентгеновского источника и мы вычисляем ее следующим образом: $P = 1 - e^{-S \times \rho}$, где S — площадь кружка неопределенности рентгеновских координат, а ρ — средняя поверхностная плотность обнаруженных звезд в поле размером $2'$ вокруг рентгеновского положения.

По данным нашей ИК фотометрии мы приводим диаграммы цвет–величина (color–magnitude diagram, CMD) для звезд в окрестностях рентгеновских координат, чтобы проверить насколько цвет возможного ИК двойника похож на цвет звезд фона. Для удобства мы представляем эти диаграммы в виде двухмерной плотности звезд в пространстве цвет–величина. Абсолютные значения плотности при этом не имеют значения, поэтому диаграммы представлены без масштаба по плотности. Цель этих CMD — сравнить цвет возможного двойника с цветом большинства звезд поля. Поскольку в настоящей выборке рентгеновские источники расположены в направлении на балдж Галактики, значительная часть звезд поля принадлежит популяции красных гигантов и субгигантов балджа с близкими значениями цвета, расположенными на том же самом расстоянии и имеющими схожие значения межзвездного поглощения. Поэтому если позиционный кандидат имеет такой же цвет, как и большинство звезд поля, маловероятно что он действительно является рентгеновским объектом. Природа ИК излучения рентгеновских источников и звезд фона различна, поэтому их ИК цвета должны отличаться. Межзвездное поглощение может компенсировать такое отличие, но вероятность этого крайне мала. Мы обсуждаем CMD в случае каждого объекта индивидуально.

2.4.2 Наблюдения и результаты

2.4.2.1 SAX J1747.0–2853

Источник SAX J1747.0–2853 представляет собой нейтронную звезду с повторяющимися рентгеновскими вспышками, расположенную всего в $\simeq 0.3$ градусах от Sgr A, впервые обнаруженную в работе [in 't Zand et al. \(1998\)](#). [Werner et al. \(2004\)](#) исследовали 45 вспышек I типа (термоядерных), произошедших в период с 1998 по 2001 год, и с их помощью определили расстояние до источника 7.5 ± 1.3 кпк. ИК поглощение на данном расстоянии в направлении на объект весьма велико и оценивается в $A_K = 2.4$ ([Marshall et al., 2006](#)), тогда как полное поглощение в Галактике на этом луче зрения составляет $A_K = 2.34$ ([Dutra et al., 2003](#)). Однако эти оценки основаны на законе поглощения [Cardelli et al. \(1989\)](#),

Таблица 2.8: Фотометрические полосы и обзоры, используемые в настоящем разделе.

Обзор	Фильтр	λ (мкм)	$\Delta\lambda$ (мкм)
UKIDSS	<i>J</i>	1.25	0.079
UKIDSS	<i>H</i>	1.63	0.146
UKIDSS	<i>K</i>	2.20	0.177
<i>Spitzer</i>	3.6 мкм	3.53	0.37
<i>Spitzer</i>	4.5 мкм	4.47	0.50
<i>Spitzer</i>	5.8 мкм	5.68	0.693
<i>Spitzer</i>	8.0 мкм	7.75	1.409
<i>WISE</i>	W1	3.38	0.34
<i>WISE</i>	W2	4.63	0.525
<i>WISE</i>	W3	12.33	3.228
<i>WISE</i>	W4	22.25	1.973

Таблица 2.9: Журнал наблюдений для данных обзора UKIDSS, используемых в настоящем разделе.

Объект	Начало наблюдения	Фильтр	Время экспозиции	Кач-во изобр.	Пред. зв. вел.
	UTC				(с)
SAX J1747.0–2853	2006-07-18 09:04:42	<i>J</i>	10	0.8	20.2
	2006-07-18 09:12:48	<i>H</i>	10	0.8	19.0
	2006-07-18 09:20:50	<i>K</i>	5	1.0	17.8
IGR J17464–2811	2006-07-18 09:06:35	<i>J</i>	10	0.9	20.0
	2006-07-18 09:14:40	<i>H</i>	10	0.9	18.7
	2006-07-18 09:22:01	<i>K</i>	5	0.9	17.5
AX J1754.2–2754	2007-05-03 12:51:07	<i>J</i>	10	0.8	19.7
	2007-05-03 12:58:53	<i>H</i>	10	0.9	18.7
	2007-05-03 13:04:41	<i>K</i>	5	0.9	18.0
IGR J17597–2201	2006-07-26 08:06:33	<i>J</i>	10	1.0	20.0
	2006-07-26 08:14:39	<i>H</i>	10	1.0	19.2
	2006-07-26 08:22:08	<i>K</i>	5	1.1	18.1
IGR J18134–1636	2006-07-23 10:38:22	<i>J</i>	10	1.0	20.0
	2006-07-23 10:46:27	<i>H</i>	10	1.0	19.0
	2006-07-23 10:54:39	<i>K</i>	5	0.9	18.0
IGR J18256–1035	2006-06-04 11:54:58	<i>J</i>	10	0.8	20.4
	2006-06-04 12:03:27	<i>H</i>	10	0.8	19.5
	2006-06-04 12:11:56	<i>K</i>	5	0.7	18.4
Ser X–1	2007-05-17 13:54:17	<i>K</i>	5	0.7	18.8
	2010-05-12 13:23:23	<i>J</i>	10	0.8	20.4
	2010-05-12 13:30:52	<i>H</i>	10	0.8	19.5
	2010-05-12 13:36:28	<i>K</i>	5	0.8	18.7

который, как известно, не всегда выполняется вблизи центра Галактики (Udalski, 2003; Geminale & Popowski, 2004).

Всякий раз, когда SAX J1747.0–2853 наблюдался чувствительными рентгеновскими телескопами, он не был в спокойном состоянии, при этом его минимальный поток в диапазоне 2–10 кэВ составлял 1.9×10^{-11} эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ во время наблюдений *Chandra* (Wijnands et al., 2002). Это значение согласуется с более свежими наблюдениями на *Swift* (Campana et al., 2009) и соответствует светимости 2×10^{35} эрг с^{-1} , которую мы принимаем за базовый постоянный уровень. Werner et al. (2004) отмечают, что двойная система находится вблизи критической светимости, ниже которой природа аккреции меняется с постоянной на транзиентную.

Мы использовали данные обзора UKIDSS GPS DR7, полученный на 3.8-м телескопе UKIRT для исследования поля SAX J1747.0–2853 (см. журнал наблюдений в Таблице 2.9). В фильтрах *H* и *K* мы обнаружили источник на расстоянии $0.56''$ от рентгеновских координат Wijnands et al. (2002) внутри формальной 1σ неопределенности рентгеновского положения (см. изображение на Рис. 2.18 и информацию о положении объекта в Таблице 2.10). Однако объект не виден в фильтре *J* вплоть до предельной звездной величины. Мы не считаем этот источник настоящим двойником SAX J1747.0–2853 из-за значительного различия координат и того факта, что его наблюдаемый цвет *H – K* совпадает с цветом большинства звезд фона в этом поле (см. саму левую панель на Рис. 2.19). Мы ожидаем, что настоящий двойник будет иметь отличные от звезд фона характеристики SED. Поскольку из рентгеновских данных следует, что SAX J1747.0–2853 также, как и большинство звезд на CMD, находится в балдже Галактики, его настоящий ИК двойник должен иметь такое же межзвездное поглощение, которое не сможет заметным образом изменить разницу в собственных цветах и, следовательно, их наблюдаемые цвета должны отличаться. Поэтому мы считаем, что обнаруженный объект является случайной проекцией звезды балджа на кружок ошибки рентгеновского положения.

Мы также исследовали это поле в архиве данных обсерватории *Spitzer*. Ближайший объект из каталога GLIMPSE находится в $2''$ от положения двойника в ближнем ИК диапазоне и поэтому вряд ли связан с SAX J1747.0–2853. Каталог *WISE* не содержит объектов в $2''$ радиусе от рентгеновского положения.

Известно, что SAX J1747.0–2853 демонстрирует вспышки длиной ~ 60 дней с интервалом 185 дней (Brandt et al., 2007), поддерживая примерно постоянную светимость между ними. В частности, он находился в состоянии вспышки в феврале (Chenevez et al., 2006b) и сентябре (Wijnands et al., 2006b) 2006 года, поэтому мы предполагаем, что источник находился в спокойном состоянии во время ИК наблюдений.

В отсутствие обнаруженного двойника мы можем лишь оценить верхний предел на ИК поток SAX J1747.0–2853 из предельной звездной величины изображений UKIDSS (см. Таблицу 2.9). Таким образом, мы получаем нижний предел на абсолютную звездную величину SAX J1747.0–2853 $M_K > 1.0$. В случае если звезда-донор заполняет свою полость Роша, эмпирическое соотношение из Раздела 2.2 дает верхний предел на орбитальный период двойной системы $P \lesssim 50$ часов.

2.4.2.2 IGR J17464–2811

Двойная система IGR J17464–2811 (также известная как XMMU J174716.1–281048) с нейтронной звездой невысокой светимости была обнаружена на обсерватории *XMM-Newton*

Таблица 2.10: Позиционная информация по данным в рентгеновском и ближнем ИК диапазонах для набора исследуемых в настоящем разделе источников. Для каждого объекта (кроме Ser X–1, для которого оптический двойник известен) мы приводим рентгеновские координаты со ссылкой на литературу и их 1σ неопределенность. Вероятности случайной проекции звезды фона даны для фильтра K и вычислены по формуле, обсуждаемой в Разделе 2.4.1. Колонка с обозначением возможных двойников соответствует их названиям, обсуждаемым в тексте. Звездочкой показаны двойники, предлагаемые в настоящей работе; в случае ее отсутствия мы не смогли предложить в качестве двойника ни одного позиционного кандидата. Неопределенности координат позиционных ИК кандидатов представлены в виде 1σ радиусов в угловых секундах в системе ICRS. Последняя колонка содержит угловое расстояние между ИК и рентгеновским положением.

Источник	Рентг. полож.		Ошиб. (")	Лит-ра	Вер-ть	Обоз-е	ИК полож.		Ошиб. (")	Расст-е (")
	J2000						J2000			
SAX J1747.0–2853	17:47:02.60	–28:52:58.9	0.6	[1]	0.21	-	17:47:02.642	–28:52:58.97	0.2	0.56
IGR J17464–2811	17:47:16.15	–28:10:48.0	0.6	[2]	0.18	Src A	17:47:16.195	–28:10:47.62	0.2	0.75
						Src B	17:47:16.158	–28:10:48.75	0.2	0.81
AX J1754.2–2754	17:54:14.49	–27:54:35.8	0.6	[2]	0.20	-	17:54:14.553	–27:54:36.15	0.2	0.89
IGR J17597–2201	17:59:45.52	–22:01:39.2	0.6	[3]	0.11	*	17:59:45.522	–22:01:39.31	0.2	0.18
IGR J18134–1636	18:13:28.03	–16:35:48.5	0.6	[4]	0.12	*	18:13:28.059	–16:35:48.39	0.15	0.42
IGR J18256–1035	18:25:43.83	–10:35:01.9	0.6	[5]	0.19	*	18:25:43.836	–10:35:02.09	0.2	0.20
Ser X–1	-	-	-	-	-	*	18:39:57.543	+05:02:09.61	0.2	-

1 Из [Wijnands et al. \(2002\)](#)

2 Настоящая работа

3 Из [Ratti et al. \(2010\)](#)

4 Из [Tomsick et al. \(2009\)](#)

5 Из [Tomsick et al. \(2008\)](#)

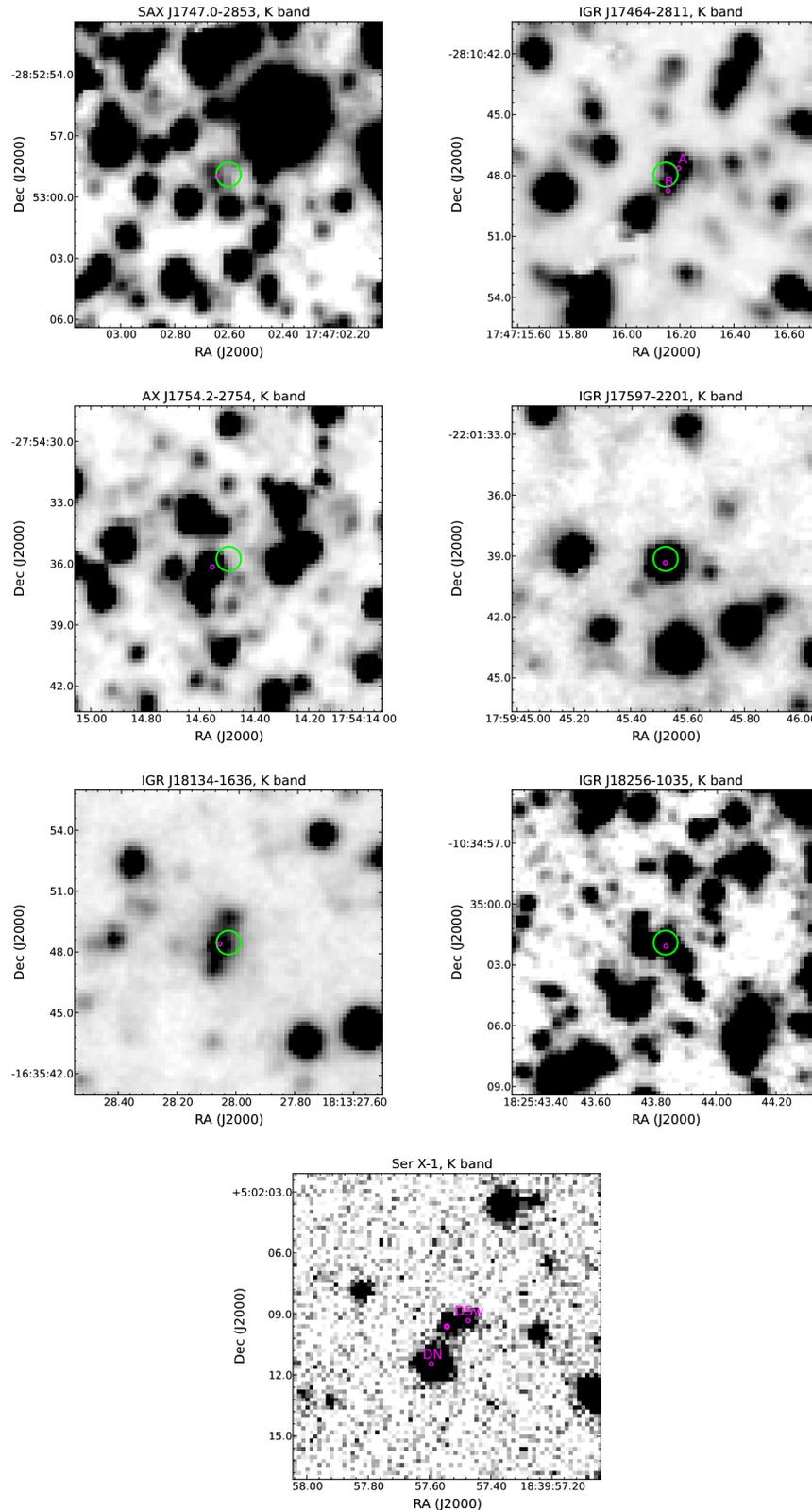


Рис. 2.18: Изображения площадок вблизи исследуемых объектов в ближнем ИК диапазоне из обзора UKIDSS GPS DR7. Неопределенности координат *Chandra* показаны большими кружками в центре каждого изображения. Позиционные кандидаты показаны пурпурными кружками и обсуждаются в тексте. Оптический двойник Ser X–1 был известен ранее. Закрытый кружок на изображении поля Ser X–1 обозначает положение известного оптического двойника (как правило для него используется номенклатура DSe), а открытые кружки показывают близлежащие объекты DN и DSw как в работе Wachter (1997).

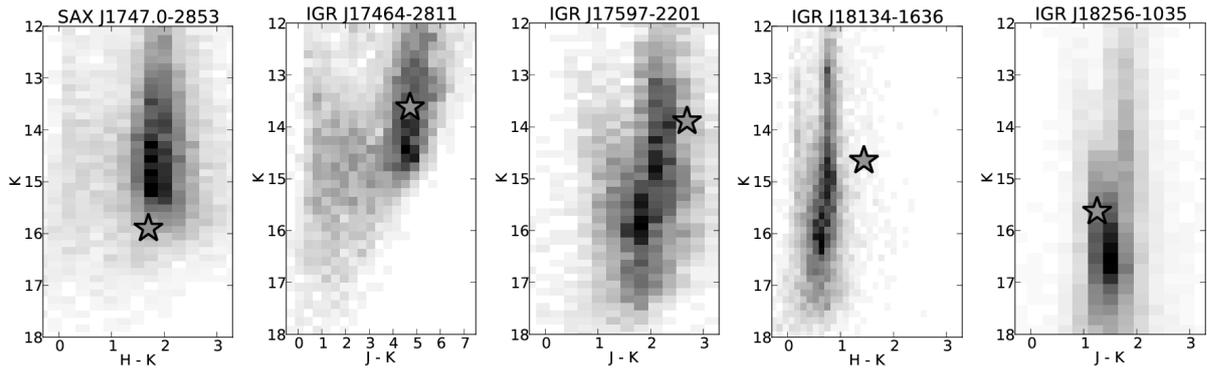


Рис. 2.19: Диаграммы цвет–величина в ближнем ИК диапазоне в виде двухмерных гистограмм для звезд в $4'$ окрестности исследуемых рентгеновских источников. Звездочками показаны предлагаемые (в случаях IGR J17597–2201, IGR J18134–1636, IGR J18256–1035) и маловероятные (SAX J1747.0–2853, IGR J17464–2811) двойники. Детальная информация по каждому объекту представлена в тексте.

(Sidoli & Mereghetti, 2003). В 2005 году *INTEGRAL* зафиксировал от этого источника рентгеновскую вспышку I типа, которая позволила оценить расстояние и светимость системы: $d \simeq 3$ кпк и $L_X = 10^{34}$ эрг с $^{-1}$ Del Santo et al. (2007). В модели Marshall et al. (2006) для этого расстояния в этом направлении поглощение на луче зрения составляет $A_K \simeq 0.5$ зв. вел. Рентгеновский спектр источника также подвержен сильной межзвездной экстинкции $N_H \simeq 6\text{--}9 \times 10^{22}$ см $^{-2}$ (Del Santo et al., 2007), которая соответствует $A_K \sim 3\text{--}5$ в пересчете по формулам Predehl & Schmitt (1995). Расхождение между значением из Marshall et al. (2006) и поглощением в рентгеновском спектре может быть объяснено наличием локального поглощения в двойной системе.

Мы исследовали поле IGR J17464–2811 в данных *JHK* из обзора UKIDSS GPS DR7 (см. Таблицу 2.9). Вблизи области неопределенности рентгеновских координат находятся два объекта, источник А ($0.7''$ от рентгеновского положения) и источник В ($0.8''$ от рентгеновского положения). Оба объекта имеют цвет $H - K \simeq 1.6$. После вычитания промоделированных профилей яркости обоих источников мы не обнаружили других объектов в области неопределенности 1σ рентгеновских координат, поэтому мы не можем заявлять о позиционном отождествлении. Смотри изображение в фильтре *K* на Рис. 2.18 и позиционную информацию по этим двум источникам в Таблице 2.10.

Мы детально исследовали более яркий и близкий источник А с целью проверки его ассоциации с рентгеновской системой. Архив обсерватории *Spitzer* содержит единственный объект G000.8344+00.0834, совпадающий с источником А в пределах неопределенностей координат, поэтому мы считаем их одним и тем же объектом. Источник В не имеет двойника в каталоге GLIMPSE. Каталог *WISE* не содержит объектов в $2''$ радиусе от рентгеновского положения.

Таким образом, мы построили SED источника А в 5 полосах и попытались его аппроксимировать моделями звездной атмосферы Castelli & Kurucz (2004) с межзвездным поглощением, получив следующие значения наилучших свободных параметров модели: $T_{\text{eff}} = 3800 \pm 200$ К и $A_K = 2.6 \pm 0.1$, при этом нормированный $\chi^2 = 0.12$.

Также мы аппроксимировали наблюдаемый SED источника А моделью Рэля–Джинса

с поглощением:

$$F_\nu = \frac{R^2}{D^2} \times \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT \times 10^{-0.4A_\nu}$$

, где F_ν — наблюдаемая плотность потока в эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{Гц}^{-1}$, ν — частота в Гц, c — скорость света, k — постоянная Больцмана, T — эффективная температура черного тела в кельвинах, R — радиус в см, D — расстояние в см, A_ν — экстинкция на луче зрения на данной частоте, при заданном законе поглощения [Cardelli et al. \(1989\)](#) с параметром A_V поглощения в оптическом фильтре V . Аппроксимируя наблюдаемый SED мы получаем два параметра — коэффициент нормализации, представляющий собой комбинацию T , R , D и поглощение на луче зрения A_V . Для удобства мы выражаем поглощение в полосе K , используя соотношение $A_K/A_V = 0.11$ ([Cardelli et al., 1989](#)).

Модель Рэля–Джинса описывает наблюдаемый SED источника А хуже, чем модели звездных атмосфер, имея нормализованный $\chi^2 = 3.2$. Исправленный за поглощение и наблюдаемый поток источника А как функции частоты представлен на Рис. 2.20.

Хотя значение поглощения из аппроксимации моделью звездной атмосферы интуитивно выглядит чрезмерно большим, в трехмерной модели поглощения в Галактике [Marshall et al. \(2006\)](#) эта область относится к наиболее поглощенным, достигая этих значений уже на расстоянии 8 кпк. Наличие большого покраснения в этом направлении также очевидно из диаграммы цвет–величина для звезд в окрестности рентгеновского положения (см. Рис. 2.19), поскольку ветвь красных гигантов на CMD смещена в красную сторону до цвета $J - K \simeq 4-5$ (заметим, что источник А находится внутри этой ветви).

На основании того, что наблюдаемый SED источника А хорошо аппроксимируется простой моделью холодной звездной атмосферы и расположен на CMD внутри ветви красных гигантов, мы делаем вывод, что источник А является фоновым красным гигантом и никак не связан с IGR J17464–2811. Источник В также вряд ли является двойником IGR J17464–2811, потому что JHK цвета похожи на источник А и, таким образом, вероятно он тоже является фоновым объектом. Поэтому, мы не можем предложить ни один объект из обзоров UKIDSS и GLIMPSE в качестве двойника IGR J17464–2811 и приводим лишь верхний предел его ИК светимости, определенный из предельных звездных величин JHK изображений (см. Таблицу 2.9). Требуется более глубокие наблюдения для идентификации источника в ИК диапазоне.

Принимая $A_K = 0.5$ и расстояние до объекта 3 кпк из [Del Santo et al. \(2007\)](#), с учетом предельной звездной величины на изображении в фильтре K $m_{\text{lim}} = 17.5$, мы вычислили нижний предел на его абсолютную звездную величину в ближнем ИК диапазоне $M_K \gtrsim 4.6$. Подставляя оцененное значение постоянной рентгеновской светимости $L_X = 10^{34}$ эрг с^{-1} в соотношение период–величина для постоянных LMXB из Раздела 2.2, мы находим верхний предел на орбитальный период IGR J17464–2811 (см. Таблицу 2.11).

2.4.2.3 AX J1754.2–2754

Источник AX J1754.2–2754 был открыт в обзоре области центра Галактики обсерваторией *ASCA* ([Sakano et al., 2002](#)). Рентгеновская система присутствует на том же уровне потока в данных длительного мониторинга центра Галактики обсерваторией *INTEGRAL* ([Krivonos et al., 2007](#)). Средний поток от объекта составляет 10^{-11} эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$. В 2005 году у источника была зафиксирована рентгеновская вспышка I типа, которая позволила [Chelovekov &](#)

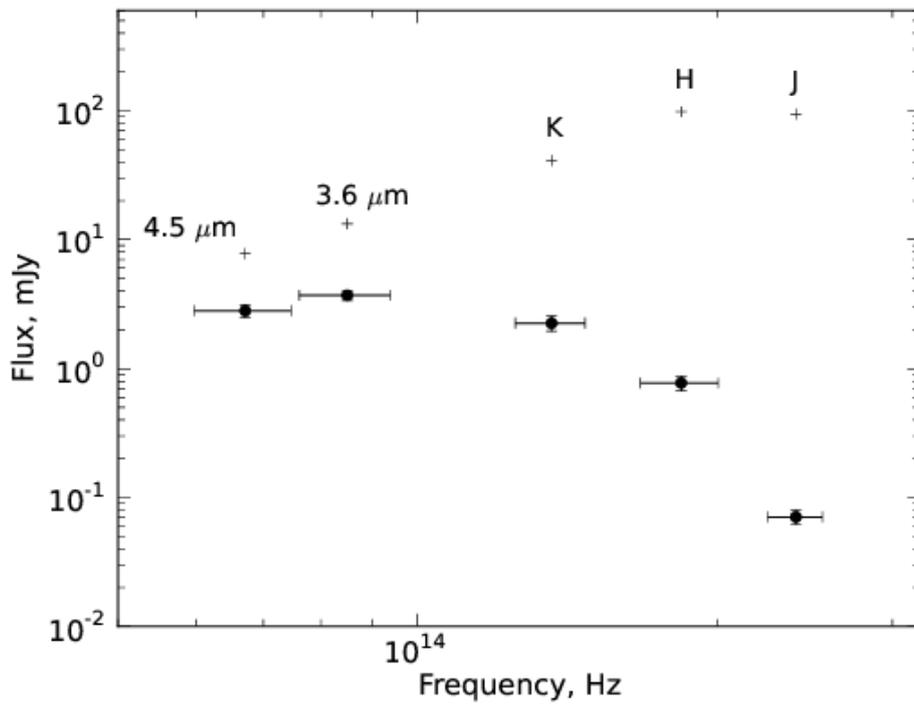


Рис. 2.20: График потока от частоты для источника А из окрестности кружка ошибки рентгеновского положения IGR J17464–2811. Верхний набор точек соответствует потоку, исправленному за Галактическое поглощение для значения наилучшей аппроксимации SED $A_K = 2.6$; нижний набор точек — наблюдаемый поток, не исправленный за поглощение. Показаны данные обзоров GLIMPSE и UKIDSS. Фотометрические ошибки и ширины фильтров для компактности изображены только для наблюдаемых значений потока, но соответственно применимы для верхнего набора точек тоже. Аналогичным образом подписи к фотометрическим полосам относятся к обоим наборам точек.

[Grebenev \(2007\)](#) классифицировать эту систему как систему с нейтронной звездой. Было оценено расстояние до объекта в $\simeq 7\text{--}10$ кпк (для разных моделей атмосферы).

Объект наблюдался обсерваторией *Chandra* 15 июля 2008 года, что позволило нам определить его астрометрическое положение (см. Таблицу 2.10). Отсутствие звезд поля, видимых одновременно на изображениях в оптическом/ИК и рентгеновском диапазонах, не позволяет существенно уточнить положение источника.

Мы исследовали поле AX J1754.2–2754 в данных обзора UKIDSS GPS DR7. Изображения в фильтрах *JHK* не содержит позиционных кандидатов внутри области 1σ неопределенности рентгеновского положения (см. Рис. 2.18), а ближайший объект находится на расстоянии $0.89''$ от него (см. Таблицу 2.10). Мы можем таким образом лишь оценить верхний предел на светимость системы в ближнем ИК диапазоне $M_K > 2.8$. Отметим, что качество наблюдательной ночи было ниже среднего, поэтому предельная звездная величина хуже, чем типичное значения для обзора UKIDSS (см. Таблицу 2.9). Ближайший объект из каталога GLIMPSE находится в $1.9''$ от положения рентгеновского источника и поэтому вряд ли связано с AX J1754.2–2754, учитывая также погрешность координат *Spitzer* $0.3''$ по каждой координате. Каталог *WISE* не содержит объектов в $2''$ радиусе от рентгеновского положения.

Мы можем ограничить орбитальный период AX J1754.2–2754, используя верхний предел на светимость в ближнем ИК диапазоне и предположив, что звезда-донор заполняет свою полость Роша. Принимая $L_X \simeq 10^{35}$ эрг с^{-1} и применяя соотношение из Раздела 2.2 мы получаем $P < 9$ ч. Основываясь на том, что система имеет постоянную светимость, мы можем сильнее ограничить ее орбитальный период. Принимая нижний порог для постоянной светимости из [Dubus et al. \(2001\)](#); [Revnivtsev et al. \(2011\) \$L_X/10^{37} \simeq 0.025R_h^{1.4}\$ мы получаем ограничение \$P \lesssim 0.5\$ ч. Допуская наличие систематической неопределенности в принятом значении светимости, разделяющей постоянный и транзиентный режимы, мы можем консервативно оценить \$P \lesssim 2\$ ч.](#)

2.4.2.4 IGR J17597–2201

Источник IGR J17597–2201 (также иногда обозначаемый XTE J1759–220) представляет собой по всей видимости LMXB с нейтронной звездой, проявляющей себя в виде рентгеновских вспышек ([Markwardt & Swank, 2003](#)) и высокого/мягкого спектрального состояния, типичного для двойных с нейтронной звездой ([Lutovinov et al., 2005](#)). [Markwardt & Swank \(2003\)](#) обнаружили в ее кривой блеска $\simeq 30\%$ падения с типичной длительностью $\simeq 5$ мин и интерпретируют эту переменность как аргумент в пользу орбитального периода 1–3 ч, хотя его значение в высшей степени неопределенно. Эта рентгеновская двойная система кроме того демонстрирует долгосрочные вариации потока (см. кривую ее блеска в Интернет⁵), что создает сложности для однозначной классификации источника на транзиентный или постоянный.

[Chaty et al. \(2008\)](#) попытались обнаружить двойника системы в ближнем ИК диапазоне на основании известной в то время $4''$ области неопределенности положения с *XMM-Newton*. В этой работе было предложено 6 возможных позиционных кандидатов в фильтрах *JHK_s*, на основании данных, полученных на телескопе ESO NTT. Позже [Ratti et al. \(2010\)](#) получили на *Chandra* неопределенность рентгеновского положения гораздо меньше-

⁵http://asd.gsfc.nasa.gov/Craig.Markwardt/galscan/html/XTE_J1759-220.html или <http://hea.iki.rssi.ru/integral/survey/source.php?srcid=086>

го размера и по результатам наблюдения в фильтре I предположили, что Кандидат 1 из работы [Chaty et al. \(2008\)](#) является настоящим двойником, хотя и не смогли предоставить надежные фотометрические данные из-за плохих условий наблюдения.

Мы исследовали изображения поля IGR J17597–2201 в данных обзора UKIDSS GPS DR7 (см. журнал наблюдений в Таблице 2.9). В кружке ошибки рентгеновского положения *Chandra* виден единственный яркий объект (см. Рис. 2.18), совпадающий с положением Кандидата 1 из [Chaty et al. \(2008\)](#) и согласующийся в наших данных с их фотометрическими измерениями. Мы предлагаем его в качестве позиционного двойника IGR J17597–2201 и приводим его фотометрические свойства в Таблице 2.11. Отметим, что как и ожидается, двойник краснее чем большинство звезд поля в его окрестности (см. третью панель слева на Рис. 2.19).

В каталоге GLIMPSE содержится единственный объект G007.5695+00.7703, детектируемый в фильтрах 3.6 и 4.5 мкм внутри 1σ неопределенности рентгеновского положения и мы считаем его тем же объектом. Хотя каталог не содержит данных об этом источнике в более красных фильтрах, он ясно детектируется на изображении в фильтре 5.8 мкм, поэтому мы смогли провести фотометрические PSF измерения и оценить его звездную величину в фильтре 5.8 мкм и верхний предел в фильтре 8.0 мкм (см. Таблицу 2.11). Каталог *WISE* не содержит объектов в радиусе $2''$ от рентгеновского положения.

Мы аппроксимировали наблюдаемый SED моделью Рэля–Джинса как описано выше в Разделе 2.4.2.2 для проверки наблюдаемых данных на предмет совместимости с звездным SED. Значение поглощения на лучшем зрении для наилучшей аппроксимации оказалось равным $A_K = 1.77 \pm 0.07$ при нормализованном $\chi^2 = 2.8$. Мы считаем качество этой аппроксимации удовлетворительным, особенно учитывая неизвестные систематические различия между используемыми каталогами и наблюдения вероятно переменного объекта в разные эпохи.

Наблюдаемые и исправленные за поглощение потоки IGR J17597–2201 представлены на Рис. 2.21. Здесь мы приняли значение поглощения $A_K \simeq 2.65$ зв. вел., полученное из рентгеновских данных [Chaty et al. \(2008\)](#), хотя значение из нашей наилучшей аппроксимации SED несколько меньше.

Расстояние до этой двойной системы было оценено в работе [Lutovinov et al. \(2005\)](#) в 5–10 кпк на основании предположения об универсальности значения светимости, при которой нейтронные звезды переходят из одного спектрального состояния в другое. Исходя из этой оценки расстояния мы можем вычислить абсолютную звездную величину системы $M_K \simeq -2.2... - 3.1$. Такая ИК светимость обычно встречается у долгопериодичных LMXB с высокой рентгеновской светимостью (см., например, [Revnivtsev et al., 2011, 2012](#), и Раздел 2.2). Предполагая рентгеновскую светимость в момент наших ИК наблюдений равной $\simeq 5 \times 10^{35}$ эрг с⁻¹, а также что звезда-компаньон заполняет свою полость Роша, мы можем оценить орбитальный период двойной системы по соотношению из Раздела 2.2: $P \simeq 800\text{--}2000$ ч. Настолько большой орбитальный период маловероятен для системы с незначительной постоянной рентгеновской светимостью. С другой стороны, если двойная является все же транзиентной, тогда наблюдаемая светимость в ИК диапазоне может быть связана со звездой-компаньоном, которая в этом случае должна быть гигантом. Следовательно, единственный способ для этой системы излучать в рентгене с учетом предположений, принятых выше — это аккреция компактным объектом (нейтронной звездой в случае IGR J17597–2201) звездного ветра компаньона-гиганта. Подобные системы называются

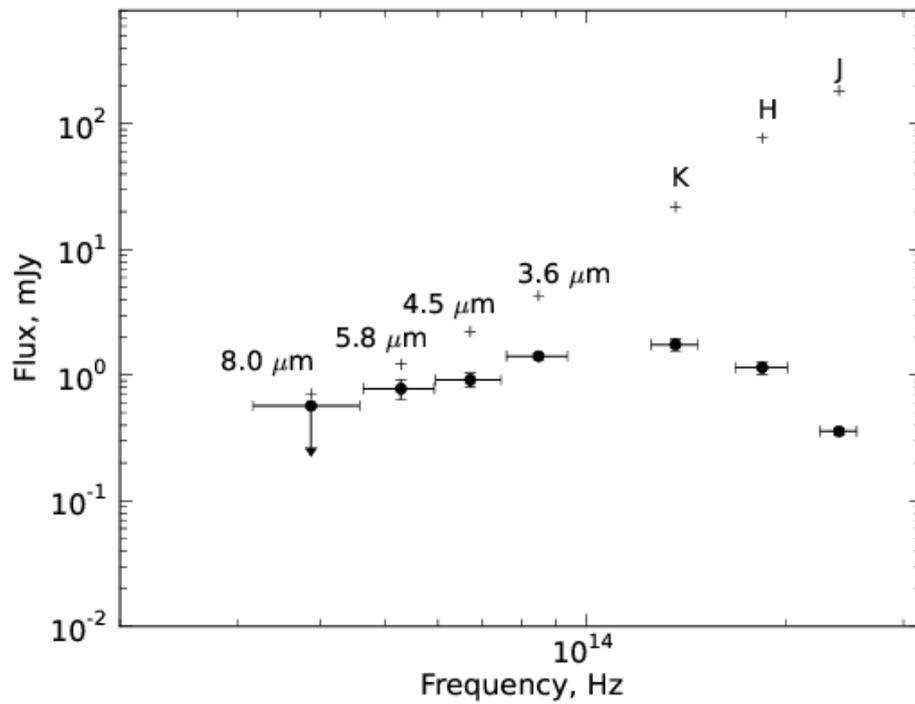


Рис. 2.21: Зависимость потока от частоты для двойника IGR J17597-2201 в ближнем ИК диапазоне. Верхний набор точек соответствует потоку, исправленному за Галактическое поглощение таким образом, что поток соответствует закону Рэля–Джинса, нижний набор точек представляет собой наблюдаемые данные без учета поглощения. Показаны данные GLIMPSE и UKIDSS. Фотометрические ошибки и ширины фильтров для компактности изображены только для наблюдаемых значений потока, но соответственно применимы для верхнего набора точек тоже. Аналогичным образом подписи к фотометрическим полосам относятся к обоим наборам точек.

симбиотическими рентгеновскими двойными (symbiotic X-ray binaries, SyXB) и являются очень редкими (Masetti et al., 2007) несмотря на теоретические предсказания на основе популяционного синтеза (Lü et al., 2012). Аккреция ветра не может иметь высокого темпа переноса массы и поэтому рентгеновская светимость таких систем ограничена уровнем 10^{34-35} эрг с^{-1} . Лишь совсем недавно рентгеновские обзоры Галактики добрались до этой светимости на характерном расстоянии в Галактике в несколько килопарсек и поэтому начинают появляться кандидаты в SyXB (например, Revnivtsev et al., 2013). Будет естественным ожидать больше открытий SyXB систем в ближайшие годы. Мы считаем, что двойная система IGR J17597–2201 скорее всего представляет собой такой пример нового класса симбиотических двойных систем в нашей Галактике. Однако для окончательных выводов о ее природе требуются целевые спектральные наблюдения.

2.4.2.5 IGR J18134–1636

Источник IGR J18134–1636 был открыт на обсерватории *INTEGRAL* (Bird et al., 2006; Krivonos et al., 2007). Его точное астрометрическое положение было определено обсерваторией *Chandra* (Tomsick et al., 2009). Рентгеновский спектр системы характеризуется существенным поглощением $N_H \simeq (4-17) \times 10^{22} \text{ см}^{-2}$.

Мы исследовали изображения в ближнем ИК диапазоне поля этой системы из обзора UKIDSS DR7 (см. Таблицу 2.9) и обнаружили объект внутри области неопределенности рентгеновских координат, видимый в фильтрах *H* и *K* и отсутствующий на изображении в фильтре *J* (см. изображение в фильтре *K* на Рис. 2.18). Мы также отождествили с этим ИК двойником объект G013.8877+00.5968 из каталога GLIMPSE, детектируемый во всех его 4 фильтрах. Расстояние между объектом UKIDSS и объектом GLIMPSE составляет $0.3''$. Кроме того, этот источник также имеется в каталоге *WISE* (Wright et al., 2010) на номинальном расстоянии $0.6''$ от рентгеновского положения. Источник из каталога *WISE* имеет схожие с данными *Spitzer* потоки и, принимая во внимание неопределенность $0.4''$ по каждой координате *WISE*, мы считаем их одним и тем же объектом.

Мы предприняли попытку определить межзвездное поглощение до источника тем же способом, что и выше, и отмечаем, что данные не могут быть аппроксимированы моделью Рэлея–Джинса в разумном диапазоне значений поглощения. Из этого следует, что в среднем ИК диапазоне в SED источника имеется избыток излучения по сравнению с чернотельным — наподобие рентгеновской двойной IGR J16318–4848 с компаньоном-сверхгигантом (Chaty & Rahoui, 2012), которая ко всему прочему тоже имеет высокое внутреннее поглощение. Тем не менее IGR J18134–1636 показывает в 2–3 раза более высокое отношение потока в среднем ИК диапазоне к потоку в ближнем ИК диапазоне (см. Рис. 2.22). Мы считаем, что избыток излучения в среднем ИК диапазоне и ограничение на расстояние $d = (L_X/10^{35})^{1/2} \times 17$ кпк свидетельствуют против того, что IGR J18134–1636 является НМХВ; но нужны дальнейшие наблюдения (в первую очередь инфракрасная спектроскопия), чтобы подтвердить эту гипотезу.

Источник G013.8877+00.5968 из каталога GLIMPSE был кроме того классифицирован как кандидат в протозвезды (young stellar object, YSO) (Robitaille et al., 2008) из-за своего красного цвета в среднем ИК диапазоне. Даже в ближнем ИК диапазоне объект существенно краснее большинства звезд из его окрестности (см. вторую панель справа на Рис. 2.19). Для проверки классификации объекта в качестве YSO мы аппроксимировали его SED, состоящий из данных UKIDSS, *Spitzer* и *WISE*, при помощи специального веб-

сервиса (Robitaille et al., 2007). Из сетки моделей мы получили наилучшее соответствие с нормированным $\chi^2 = 10.6$ для модели с расстоянием $d \simeq 600$ пк и межзвездным поглощением $A_K \simeq 3.2$. На первый взгляд этот результат не выглядит правдоподобным из-за плохой статистики, однако мы подозреваем, что ошибки данных в нашем случае недооценены, потому что фотометрические измерения были сделаны на разных инструментах и, что более важно, в разные эпохи. Вероятная переменность кандидата без сомнения добавляет разброс в измерения, выполненные не одновременно. Для оценки этого эффекта можно сравнить потоки в близких фильтрах GLIMPSE 3.6 мкм, 4.5 мкм с одной стороны и полосах *WISE* W1 и W2 соответственно с другой (см. Таблицу 2.11). Естественно было бы ожидать, что они совпадают в пределах ошибок, но в реальности отличия в 2 раза превышают формальную сумму неопределенностей измерений. Вне зависимости от причины этого расхождения — систематический ли это сдвиг между фотометрическими системами или переменность объекта — оно свидетельствует, что значение χ^2 наверняка переоценено. Мы поэтому полагаем, что в принципе ИК SED IGR J18134–1636 может быть описан моделью YSO, и даже наблюдаемый рентгеновский поток не противоречит гипотезе YSO со светимостью $L_X \simeq 10^{32}$ эрг s^{-1} , весьма типичному значению для протозвезд. Но тем не менее возникают некоторые трудности — в первую очередь с особенностями рентгеновского спектра IGR J18134–1636, а именно жестким фотонным индексом $\Gamma \simeq 1.4$ (Tomsick et al., 2009), нехарактерном для YSO с рентгеновским излучением, а во-вторых с необходимостью вводить избыточно большое межзвездное поглощение для объяснения наблюдаемого ИК SED. Полное Галактическое поглощение в направлении на источник оценивается в $A_K = 2.4$ (Schlegel et al., 1998), 2.0 (Schlafly & Finkbeiner, 2011) и 1.9 на расстоянии 15 кпк (Marshall et al., 2006), т.е. в любом случае существенно меньше, чем наше наилучшее значение из аппроксимации SED.

В самом деле, жесткий фотонный индекс IGR J18134–1636 указывает на то, что объект возможно является активным ядром галактики (Active galactic nucleus, AGN), для которых такое значение весьма типично (см., например, Lin et al., 2012). Для проверки этого предположения мы провели аппроксимацию SED в 11 полосах от ближнего до среднего ИК диапазона набором из 25 модельных SED галактик и AGN из библиотеки SWIRE (Polletta et al., 2007), оставив Галактическое поглощение и красное смещение свободными параметрами. Наилучшее соответствие (нормированный $\chi^2 = 7.3$) имела модель квазара с широкими абсорбционными линиями и высоким внутренним поглощением Mrk 231, видимого сквозь поглощение в Галактике $A_K = 1.7$ зв. вел. Вырождение аппроксимации по красному смещению не позволило сильно ограничить его значение, мы полагаем, что оно должно быть меньше 0.05. И хотя статистика наилучшей модели не выглядит особенно убедительной, мы напоминаем, что ошибки фотометрических измерений по всей видимости недооценены. Эта SED модель AGN в любом случае лучше других протестированных моделей (звездной атмосферы, Рэля-Джинса, протозвезды и других моделей из библиотеки SWIRE) описывает наши данные. Кроме того, полученное в результате аппроксимации значение поглощения на переднем плане соответствует полному поглощению в Галактике в направлении на IGR J18134–1636, а высокое внутреннее поглощение в рентгеновском спектре также совпадает с природой наилучшей модели (квазар с высоким внутренним поглощением). Учитывая все вышесказанное, мы заключаем, что IGR J18134–1636 — это поглощенный AGN, видимый сквозь диск нашей Галактики.

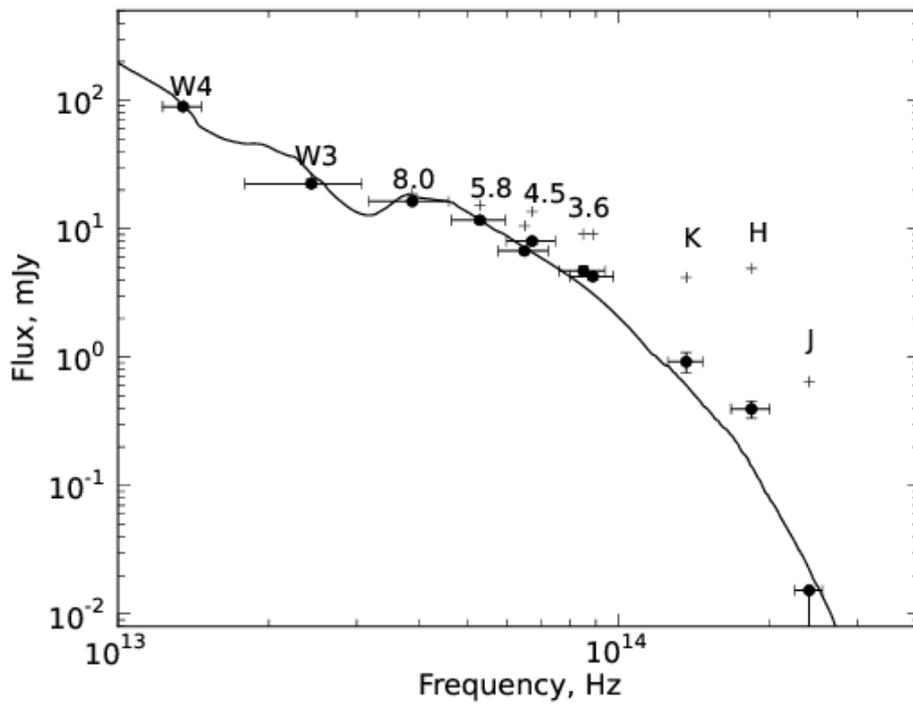


Рис. 2.22: Зависимость потока от частоты для ИК двойника IGR J18134–1636. Верхний набор точек показывает поток, исправленный за поглощение из наилучшей аппроксимации $A_K = 1.7$, нижний набор точек соответствует наблюдаемому потоку. Сплошная линия показывает наилучшую аппроксимацию наблюдаемого SED моделью квазара широкими абсорбционными линиями и высоким внутренним поглощением Mrk 231. Показаны данные GLIMPSE, UKIDSS и WISE. Фотометрические ошибки и ширины фильтров для компактности изображены только для наблюдаемых значений потока, но соответственно применимы для верхнего набора точек тоже. Аналогичным образом подписи к фотометрическим полосам относятся к обоим наборам точек.

2.4.2.6 IGR J18256–1035

Этот рентгеновский источник был обнаружен на обсерватории *INTEGRAL* (Bird et al., 2006; Krivonos et al., 2007). Его положение позднее было уточнено по данным телескопа *Swift* Landi et al. (2007), а затем по результатам наблюдения на *Chandra* Tomsick et al. (2008), в момент которого поток в диапазоне 0.3–10 кэВ составил 2.9×10^{-12} эрг с⁻¹ см⁻².

Мы проанализировали поле IGR J18256–1035 в данных обзора UKIDSS GPS DR7 (см. журнал наблюдений в Таблице 2.9). Внутри неопределенности положения *Chandra* на изображениях в фильтрах *JHK* виден единственный объект, который мы считаем двойником этой рентгеновской двойной. Каталог GLIMPSE содержит объект G020.5947+00.8120, детектируемый лишь в фильтре 3.6 мкм, расположенный всего в 0.5'' от рентгеновских координат. Хотя формально этот объект тоже может быть двойником рентгеновского, мы полагаем, что из-за худшего по сравнению с телескопом UKIRT углового разрешения детектора IRAC на телескопе *Spitzer* данный источник из каталога GLIMPSE является блендой 3 объектов, видимых в фильтре *K* на Рис. 2.18 вблизи области неопределенности рентгеновских координат. Поэтому измерения из каталога GLIMPSE не могут сравниваться с данными UKIDSS. Гипотеза про бленду подтверждается тем фактом, что профиль яркости объекта GLIMPSE явным образом вытянут. Кроме того, наблюдаемый SED в 4 фильтрах (*JHK* и 3.6 мкм) не описывается ни одной гладкой моделью ИК излучения, поскольку поток в фильтре 3.6 мкм на 1.5 зв. вел. ярче, чем экстраполяция из потоков в фильтрах *JHK*. Каталог *WISE* не содержит объектов в радиусе 2'' от рентгеновского положения.

Рентгеновский спектр объекта демонстрирует существенное поглощение на луче зрения. В работе Tomsick et al. (2008) колонка поглощения была оценена в $\simeq 3.1 \times 10^{22}$ см⁻² при аппроксимации спектра степенным законом с фотонным индексом $\Gamma = 0.1$. С другой стороны, рентгеновский спектр из работы Tomsick et al. (2008) может также быть описан степенной моделью с более крутым фотонным индексом. В этом случае величина поглощения будет, несомненно, меньше.

SED ИК двойника в фильтрах *JHK* может быть описано моделью Рэля–Джинса с поглощением $A_K = 1.0$ (нормированный $\chi^2 = 1.3$). В трехмерной модели Marshall et al. (2006) поглощения в Галактике это значение в заданном направлении соответствует расстоянию 10 кпк. Величина полного поглощения в Галактике по этому лучу зрения в работе Schlegel et al. (1998) меньше, чем в Marshall et al. (2006), $A_K = 1.1$ (сравните с $A_K = 0.9$ в Schlafly & Finkbeiner, 2011). Большое значение поглощения на луче зрения по сравнению с полным Галактическим поглощением может указывать на то, что расстояние до объекта никак не меньше $\simeq 5$ –10 кпк.

В то же время, если мы рассмотрим модель аккреционного диска LMXB из Раздела 2.2, такая комбинация рентгеновского потока, наблюдаемой звездной величины в фильтре *K* и реалистичного значения поглощения требует орбитального периода двойной системы в интервале между 200 и 1000 часами и чрезмерно красного цвета (до межзвездного покраснения) $J - K > 4$ в реалистичном диапазоне расстояний. Мы интерпретируем это несоответствие как аргумент против того, что источник является LMXB. При межзвездном поглощении $A_K \simeq 1.0$ и наблюдаемом цвете $J - K = 1.25$ объект должен быть подлинно голубым как, например, звезда спектрального класса В с действительным цветом до покраснения $(J - K)_0 = -0.25$.

На основании аргументов о цвете объекта и межзвездном поглощении мы полагаем, что он является НМХВ. Абсолютная звездная величина гиганта класса В $M_K \simeq -2$ (Pickles, 1998) означала бы расстояние порядка 20 кпк и высоту 300 пк над плоскостью Галактики, которая выглядит чрезмерно большой для этого класса объектов (Lutovinov et al., 2013). Но при этом мы можем заметить, что IGR J18256–1035 расположен всего в $50'$ от ближайшего комплекса звездообразования 20.7–0.1 в каталоге Russeil (2003), что хорошо согласуется с корреляцией между пространственным положением НМХВ и ОБ-ассоциациями (Bodaghee et al., 2012; Coleiro & Chaty, 2013). Кинематические расстояния до комплекса 20.7–0.1 (11.8 кпк) и другой области звездообразования 21.0+0.0 (14.0 кпк) примерно в $55'$ от объекта могут служить ориентировочной оценкой расстояния до IGR J18256–1035, если он имеет меньшую, чем звезда класса ВIII светимость.

Мы подчеркиваем, что окончательные выводы о природе источника могут быть сделаны лишь по результатам дополнительных наблюдений, без которых невозможно отвергнуть гипотезу о случайной проекции на луче зрения близкой звезды класса В, неактивной в рентгеновском диапазоне, и более далекой (и слабой) LMXB.

2.4.2.7 Ser X–1

Источник Ser X–1 был открыт на самом заре рентгеновской астрономии в ракетном эксперименте Bowyer et al. (1965). Наблюдения рентгеновских вспышек I типа позволило установить, что компактным объектом в системе является нейтронная звезда (Swank et al., 1976; Li et al., 1977). Расстояние до двойной оценивается в 9.5–12.7 кпк (Jonker & Nelemans, 2004). Ее средняя светимость составляет 5×10^{36} эрг с^{-1} (Masetti et al., 2004).

Долгое время считалось, что оптическим двойником Ser X–1 является переменная звезда MM Ser. Однако она позднее оказалась блендой из нескольких объектов. Сначала Thorstensen et al. (1980) обнаружили, что ранее отождествленный двойник состоит из двух компонент, несвязанной северной, получившей обозначение DN, и действительно переменной южной компонентой DS, отстоящей на $2.1''$. Затем Wachter (1997) при помощи PSF фотометрии установили, что южная компонента бленды DS в свою очередь состоит из двух оптических объектов, восточного DSe и западного DSw, разделенных расстоянием $1''$. Wachter (1997) не смогли надежно измерить поток источника DSe, однако на основании его голубого цвета авторы предложили его в качестве подлинного двойника Ser X–1. Позднее Hynes et al. (2004) провели высококачественные спектральные наблюдения бленды источников DSe и DSw и, основываясь на спектральных особенностях, подтвердили, что DSe действительно является LMXB.

Поле Ser X–1 наблюдалось в обзоре UKIDSS дважды (см. Таблицу 2.9), сначала только в фильтре K (данные доступны, начиная с релиза DR7 и позднее) и затем во всех трех фильтрах JHK (данные доступны в релизе DR9). Оба наблюдения выполнены во время идеальных фотометрических условий. В них уверенно разрешаются все обсуждаемые бленды, ранее составлявшие MM Ser, включая сам истинный двойник DSe (см. Рис. 2.18), свойства которого мы приводим в Таблице 2.11. Две эпохи с разными значениями звездной величины объекта в фильтре K указывают на наличие небольшой переменности, но значимость этого не очень высока.

Заметим также, что исправленный за покраснение цвет Ser X–1 $J - K = -0.1$ прекрасным образом соответствует значению $J - K \simeq 0.0$, ожидаемому из модели облученного аккреционного диска в двойной системе с переполнением полости Роша (см. Раздел 2.2).

Каталог GLIMPSE не содержит объектов на расстоянии менее $2''$ от оптических координат Ser X–1.

2.4.3 Резюме

Мы проанализировали поля вблизи положений 7 рентгеновских источников в данных трех инфракрасных обзоров, UKIDSS, GLIMPSE и *WISE*. Все источники кроме двух ранее не имели надежной классификации и оптического отождествления. В 4 случаях мы обнаружили позиционных двойников внутри секундных областей неопределенности рентгеновского положения, а в 3 случаях были установлены верхние пределы на их яркость. На основании этих фотометрических данных в нескольких фильтрах мы установили, что 1 объект из нашей выборки представляет собой редкую симбиотическую рентгеновскую двойную, 4 источника являются LMXB (один из них, Ser X–1, достаточно хорошо изучен, но ранее не имел фотометрических измерений в ИК), 1 объект является HMXB и 1 — вероятным AGN. Для одной из LMXB без обнаруженных двойников, AX J1754.2–2754, мы приводим верхнюю оценку орбитального периода 2 ч, сделанную при помощи соотношения из Раздела 2.2 для светимости ближнем ИК диапазоне облученного аккреционного диска в системе со звездой-компаньоном, переполняющей свою полость Роша. Мы приводим результаты астрометрических измерений в Таблице 2.10 и фотометрические измерения, классификацию по типам, оценки орбитальных периодов и абсолютных звездных величин в Таблице 2.11.

Таблица 2.11: Сводная таблица фотометрических измерений в ближнем и среднем ИК диапазонах и оценок орбитальных периодов для исследуемых объектов. Наблюдаемые звездные величины (позиционных кандидатов или верхние пределы в случае отсутствия обнаружения) даны в системе Веги без поправок за поглощение. Ошибки звездных величин соответствуют значимости 1σ . Абсолютные звездные величины M_K в фильтре K вычислены с учетом оценок расстояния из литературы и поглощения A_K из работы [Marshall et al. \(2006\)](#), если не указано иное. Орбитальные периоды LMXB даны в часах и рассчитаны на основании соотношения из Раздела 2.2 и рентгеновских светимостей из литературы, которая обсуждается в тексте.

Объект	Тип	Набл. зв. вел-ны (Вега)	A_K	M_K (Вега)	Период (ч)
SAX J1747.0–2853	NS LMXB	$J > 20.2; H > 19.0; K > 17.8$	2.4^a	$\gtrsim 1.0$	$\lesssim 50$
IGR J17464–2811	NS LMXB	$J > 20.0; H > 18.7; K > 17.5$	0.5^a	$\gtrsim 4.6$	$\lesssim 4$
AX J1754.2–2754	NS LMXB	$J > 18.7; H > 18.7; K > 18.0$	0.9^a	$\gtrsim 2.2\text{--}2.6$	$\lesssim 2$
IGR J17597–2201	SyXB	$J = 16.58 \pm 0.07; H = 14.87 \pm 0.11; K = 13.89 \pm 0.11$ $m_{3.6} = 13.244 \pm 0.054; m_{4.5} = 13.230 \pm 0.127$ $m_{5.8} = 12.93 \pm 0.18; m_{8.0} > 12.6$	2.65^b	$\simeq -2.2\text{...} - 3.1$	-
IGR J18134–1636	AGN	$J > 20.0; H = 16.03 \pm 0.15; K = 14.59 \pm 0.18$ $m_{3.6} = 11.943 \pm 0.089; m_{4.5} = 10.879 \pm 0.048$ $m_{5.8} = 9.985 \pm 0.042; m_{8.0} = 8.984 \pm 0.024$ $m_{W1} = 12.156 \pm 0.074; m_{W2} = 11.019 \pm 0.036$ $m_{W3} = 7.876 \pm 0.072; m_{W4} = 4.931 \pm 0.043$	$\simeq 1.9^a$	-	-
IGR J18256–1035	HMXB	$J = 16.88 \pm 0.15; H = 16.16 \pm 0.16; K = 15.63 \pm 0.15$	$\simeq 1^c$	$\simeq -1\text{...} - 2$	-
Ser X–1	NS LMXB	$J = 17.34 \pm 0.10; H = 17.27 \pm 0.06$ $K_{\text{epoch1}} = 17.01 \pm 0.06$ $K_{\text{epoch2}} = 17.14 \pm 0.09$	0.3^a	$\simeq 2.1$	$\simeq 7.0$

^a Из [Marshall et al. \(2006\)](#)

^b Из [Chaty et al. \(2008\)](#)

^c Из аппроксимации законом Рэлея–Джинса, настоящая работа

Глава 3

Нормальные и компактные галактики

Для понимания наблюдательных аспектов эволюции галактик требуется классифицировать их по различным свойствам, таким как морфологический тип, светимость, характеристики звездного населения, внутренняя динамика. Сегодня, в эпоху глубоких широкопольных обзоров неба, существует потребность в эффективных механизмах классификации и селекции галактик при помощи минимально доступной информации. Традиционно для этой цели используются диаграммы цвет–цвет и цвет–величина (CMD).

Бимодальное распределение галактик на оптических CMD в координатах $(g - r, M_r)$ (Strateva et al., 2001; Baldry et al., 2004; Blanton et al., 2003a) содержит узкую “красную последовательность” (Visvanathan & Sandage, 1977) ($\sigma(g - r) \approx 0.04$ зв. вел.), относящуюся к населению в основном раннего типа галактик (эллиптических и линзовидных) и широкое “синее облако”, где доминируют звездообразующие системы. Хотя оптическая CMD и позволяет выбирать объекты красной последовательности из объектов, находящихся на одном красном смещении, например, в скоплениях галактик, ее нельзя использовать ни для классификации галактик без дополнительных наблюдательных данных, таких как спектры или изображения высокого разрешения, ни для идентификации синих галактик, находящихся на неизвестных красных смещениях.

Оптические CMD подвержены нескольким вырождениям: а) не существует однозначной связи между морфологическим типом галактики и ее положением на CMD; б) красная часть CMD засорена примерно на 25% галактиками позднего типа, ослабленными пылью и имеющими медленные темпы звездообразования (star formation, SF); в) синее облако пересекается с галактиками класса E+A, в которых уже произошла вспышка звездообразования (poststarburst galaxies, PSG) (Dressler & Gunn, 1983), имеющими синий цвет, морфологию раннего типа, а также зачастую дисковую кинематику (Chilingarian et al., 2009b), но с низкими темпами звездообразования или полным его отсутствием.

В пространстве $(NUV - r, M_r)$ как красная последовательность, так и синее облако становятся выраженными, но в то же время достаточно широкими ($\sigma(NUV - r)$ 2 зв. вел.) последовательностями (Wyder et al., 2007). Такая ширина красной последовательности обусловлена чувствительностью УФ потока даже к малым долям молодых звезд, что, как было показано, связано с окружением галактик ранних типов (Kaviraj et al., 2007). В то же время, а) последовательности являются слишком широкими, чтобы использовать их для эффективной фотометрической селекции галактик; б) до сих пор существует неопределенность между цветом $NUV - r$ и морфологическим классом галактик, а также наличием или отсутствием протекающего звездообразования: PSG по-прежнему находятся в синем

облаке.

В первой части настоящей главы мы отвечаем на эти вопросы путем построения на основе CMD фотометрического соотношения, ставшего наиболее точной из известных зависимостей подобного рода. Одним из важных практических свойств соотношения стало выпадение из него некоторых редких видов галактик — в первую очередь, компактных эллиптических (compact elliptical, cE) галактик, которым посвящена вторая часть настоящей главы.

Компактные эллиптические галактики (Price et al., 2009; Chilingarian et al., 2009a; Chilingarian & Bergond, 2010; Norris et al., 2014) являются редкими объектами (ранее было известно менее 30 таких систем) с высокими звездными плотностями, характерными для центров гигантских эллиптических галактик, но с массами, на два порядка меньшими ($M \sim 10^9 M_\odot$). Вообще говоря считается, что все галактики сформировались путем иерархических слияний из маленьких строительных блоков в большие системы (White & Frenk, 1991; Cole et al., 2000), и история таких взаимодействий запечатлена в наблюдаемых свойствах этих объектов. Некоторые галактики, такие как ультракомпактные карлики (Drinkwater et al., 2003) и компактные эллиптические, имеют явные признаки сильных приливных взаимодействий с массивными галактиками (Huxor et al., 2011), вероятно, ободравшими большую часть звезд у их галактик-прародительниц. При этом компактные эллиптические галактики находят преимущественно в центрах скоплений галактик, рядом с массивной центральной галактикой, что согласуется с описанной выше гипотезой их образования.

Недавнее открытие изолированных cE галактик (Huxor et al., 2013; Paudel et al., 2014), не принадлежащих ни к какому скоплению или группе, дало толчок новым спорам относительно сценариев их образования: все ли они формируются приливным обдиранием, или же есть различные механизмы, такие как, например, слияния карликовых галактик со специфической морфологией (Paudel et al., 2014). Слияния карлик–карлик действительно случаются в окрестностях массивных галактик (Rich et al., 2012; Amorisco et al., 2014). Однако, нет свидетельств, что такие события могут происходить в бедном окружении, к тому же свойства результирующих объектов мало похожи на свойства cE. Существование значительного числа изолированных cE галактик в рамках этой гипотезы будет свидетельствовать о существенно больших, чем предсказано в численных моделях, темпах слияний карлик–карлик (Fakhouri et al., 2010), что стало бы вызовом для стандартной парадигмы иерархического сгущивания галактик.

3.1 Универсальное соотношение цвет–цвет–звездная величина для галактик в оптическом и УФ диапазоне

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работе Chilingarian & Zolotukhin (2012). Часть методических результатов содержится в работе Chilingarian et al. (2010).

В настоящем разделе мы показываем, что добавление ближнего ультрафиолетового цвета (*GALEX* *NUV* $\lambda_{eff} = 227$ нм) к оптической CMD ($g - r$ vs M_r) открывает тесную связь в трехмерном пространстве цвет–цвет–величина, плавно тянущуюся от “голубого облака” до “красной последовательности”. Мы обнаружили, что 98% галактик из 225 000 на небольших красных смещениях ($z < 0.27$) хорошо “ложатся” на гладкую поверхность

$g - r = F(M_r, NUV - r)$ со стандартным отклонением 0.03–0.07 зв. вел., тем самым являясь самым тесным из известных фотометрических соотношений, простирающимся в диапазоне ~ 0.9 зв. вел. по скорректированному за красное смещение цвету $g - r$. Подобные соотношения существуют и для других ближних УФ–оптических цветов. Кроме того наблюдается сильная корреляция между морфологическим типом и интегральными цветами $NUV - r$ галактик, в то время как связь морфологии с цветом $g - r$ неоднозначна. Галактики редких типа, такие как E+A, или галактики, ободренные приливными силами, выпадают из этого соотношения и занимают выделенные области в этом трехмерном пространстве параметров. Используя модели звездных населений для галактик с разной историей звездообразования, мы показали, что а) распределение $(NUV - r, g - r)$ при заданной светимости формируется объектами с постоянной и экспоненциально уменьшающейся скоростью звездообразования с различными характерными временными шкалами, при этом галактики в зоне красной последовательности на диаграмме также могут быть объяснены моделью простого звездного населения; б) эволюция цвета для моделей с экспоненциальным затуханием звездообразования происходит вдоль соотношения, что по-видимому указывает на слабую эволюцию его формы вплоть до красного смещения 0.9; в) галактики с прервавшимся звездообразованием имеют очень короткий фазовый переход, расположенный вне соотношения, что объясняет редкость галактик типа E+A. Это соотношение может использоваться в качестве мощного инструмента для классификации галактик при отсутствии информации для определения морфологического типа. Математическим следствием предлагаемого соотношения является возможность точной и простой оценки красного смещения всего по трем измерениям широкополосной фотометрии. Мы показали, что этот простой подход, будучи примененным к данным SDSS и GALEX, работает лучше, чем большинство существующих фотометрических методов определения красного смещения, применяемых для многоцветных наборов данных. Таким образом, это соотношение можно использовать в качестве эффективного метода поиска галактик на промежуточных красных смещениях ($0.3 < z < 0.8$) с использованием только лишь оптических изображений.

3.1.1 Фотометрическая выборка галактик в УФ и оптическом диапазоне

3.1.1.1 Создание выборки

В основном создание базового каталога для этого исследования описано в Разделе 1.1 методической Главы 1. Здесь мы приводим тем не менее сокращенное описание процедуры из-за различия некоторых нюансов — в частности, использованных версий больших цифровых обзоров неба, которые приводят к различию в размерах выборки и некоторым другим непринципиальным расхождениям. Важно подчеркнуть, что все результаты этого исследования полностью воспроизводятся в данных каталога RCSED, подвыборкой которого является базовый каталог, который мы используем в настоящем разделе.

Используя данные Виртуальной Обсерватории, мы составили фотометрическую выборку $\sim 225\,000$ галактик без квазаров и активных ядер галактик (active galactic nuclei, AGN) на основе их спектральной классификации согласно 7-му релизу данных (Data Release 7, DR7) Слоановского цифрового обзора неба (SDSS) (Abazajian et al., 2009) в диапазоне абсолютных звездных величин $-25 < M_z < -15$ зв. вел. и на низких красных смещениях ($0.007 < z < 0.27$). Мы провели позиционное отождествление галактик из спектральной

выборки SDSS с галактиками из 5-го релиза данных (GR5) спутника *GALEX* (Galaxy Evolution Explorer) (Martin et al., 2005) в системе *CasJobs* (Szalay et al., 2002) и откинули совпадения, разделенные более, чем $3''$ на небе.

В первую очередь мы использовали систему *CasJobs* для отбора галактик в диапазоне красных смещений от 0.007 до 0.27 из спектральной выборки SDSS DR7 в полосах обзора, в которых уже сделаны или планируются наблюдения на телескопе UKIRT (United Kingdom Infrared Telescope) в рамках глубокого обзора неба в ближнем ИК диапазоне UKIDSS (Lawrence et al., 2007). Мы выбрали только те объекты, которые были классифицированы как галактики спектроскопическим программным обеспечением для потоковой обработки данных SDSS (`SpecClass = 2`), что позволило нам отбросить квазары и активные ядра галактик. Этот список содержит 377 923 источников.

После этого мы добавили данные *GALEX* GR5 и данные UKIDSS DR8, объединив полученный ранее список объектов с этими списками, используя критерий наилучшего соответствия по координатам в пределах углового расстояния $3''$. Для данных *GALEX* мы использовали предварительно рассчитанное соответствие между SDSS и *GALEX* (Budavári et al., 2009), доступное через *GALEX CasJobs* в виде таблицы пар объектов угловым расстоянием между ними не более $3''$. Для UKIDSS отождествление было проделано аналогичным образом. Такая процедура для SDSS–*GALEX* дала на выходе 223 646 галактик, обнаруженных в фильтре *NUV*, 144 639 в фильтре *FUV* ($\lambda_{eff} = 155$ нм), и 136 781 в обоих фильтрах. Для SDSS–UKIDSS получилось 176 868 галактик, обнаруженных в полосе Y, 178 806 в J, 187 789 в H, 188 221 в K, среди них 158 578 во всех четырех полосах ближнего ИК диапазона. Для 96 939 из этих галактик мы имели фотометрические данные в фильтре *[GALEX] NUV*, в том числе 59 994 с измерениями в фильтре *GALEX FUV*. Все технические операции с таблицами были выполнены с помощью программного обеспечения STILTS (Taylor, 2006).

Мы использовали петросьяновские звездные величины из SDSS (*PetroMag_**), откалиброванные звездные величины (*nuv_mag* и *fuv_mag*) из *GALEX* для протяженных источников и петросьяновские звездные величины из UKIDSS (*PetroMag_**), чтобы построить распределение спектральной энергии по длинам волн. Здесь хотелось бы отметить, что даже несмотря на то, что модельные звездные величины SDSS (*modelMag_**), как правило, имеют более низкие, чем петросьяновские величины, случайные ошибки, особенно в синих фотометрических фильтрах, в случае галактик “голубого облака” они часто содержат неучтенные систематические ошибки из-за различия между наблюдаемым распределением света и тем, которое предполагалось (осесимметричным экспоненциальным законом или законом Вокулера) при вычислении модельных величин. Петросьяновские звездные величины могут недооценивать полный поток от галактики на 15–20% в случае вокулеровского профиля для галактик, видимых плашмя (Yasuda et al., 2001). Тем не менее, в нашем случае это смещение одинаково для данных SDSS и UKIDSS, в то время как для измерений *GALEX* это не важно из-за высоких фотометрических ошибок, значительно превышающих 15% для красных галактик, чья форма профиля яркости пострадала от этого эффекта. Поскольку *GALEX* и SDSS содержат фотометрические измерения в системе AB, а величины в UKIDSS представлены в системе Веги, мы сделали преобразования нуль-пунктов для измерений обзора UKIDSS из системы Веги в систему AB, формулы которых доступны в литературе (Hewett et al., 2006). В настоящем разделе мы используем в основном интегральную фотометрию галактик, поэтому апертурные эффекты здесь

несущественны, и мы можем не применять апертурные коррекции.

После этого все величины были скорректированы за Галактическое поглощение. Каталоги UKIDSS и SDSS содержат оценки величины поглощения для каждой из своих фотометрических полос, в то время как для *GALEX* мы использовали данные по $E(B - V)$ (Schlegel et al., 1998) и рассчитывали поглощение в УФ диапазоне, предполагая $A_{NUV} = 8.87 \cdot E(B - V)$, $A_{FUV} = 8.29 \cdot E(B - V)$.

Таким образом, мы создали откалиброванную фотометрическую выборку галактик на малых красных смещениях в 11 полосах, от дальнего УФ до ближнего ИК диапазона. Описанную процедуру легко воспроизвести на любом компьютере, имеющем доступ в Интернет, однако, в связи с политикой ограниченного доступа к данным вместо каталога UKIDSS DR8 придется использовать последний на момент написания работы его публичный релиз DR4.

Систематические ошибки фотометрии точечных источников в SDSS не превышают 1% (Ivezić et al., 2004) в полосах g и r , в то время как для протяженных источников они могут быть в несколько раз больше. Однако, поскольку красная последовательность на оптической CMD нашей выборки, построенная по измерениям галактик, расположенных на большой площади на небе, довольно тесная (0.03 зв. вел.), мы приходим к выводу, что либо систематические ошибки оптических величин находятся в пределах этого диапазона, или же они сильно коррелируют между g и r полосами, так что не могут повлиять на результаты нашего анализа. Статистические ошибки фотометрических измерений SDSS, как правило, меньше 0.015 зв. вел., что отражает сам механизм выбора спектральных целей в обзоре SDSS: галактики из спектральной выборки по крайней мере на несколько величин ярче, чем предельная звездная величина фотометрического обзора. В то же время, медианное значение ошибки NUV такое же (0.15 зв. вел.), как и во всей выборке. Тем не менее, диапазон изменения цвета $NUV - r$ в галактиках 7.5 зв. вел. по сравнению с 0.9 зв. вел. в $g - r$. Таким образом, относительное “разрешение” нашего анализа очень похоже в обоих цветах.

3.1.1.2 Расчет k -поправок

Так как мы сравниваем фотометрические измерения галактик на различных красных смещениях, мы должны исправить их за изменение диапазона длин волн, попадающих под кривые пропускания фильтров, или применить т.н. k -поправки (Oke & Sandage, 1968; Hogg et al., 2002; Blanton & Roweis, 2007). Их вычисление является важным шагом для получения полностью откалиброванной однородной выборки данных. Здесь мы приводим некоторые подробности касательно расчета k -поправок в УФ диапазоне *GALEX*, в то время как процедура для оптических и ближних ИК фильтров исчерпывающе описана ранее (Oke & Sandage, 1968; Hogg et al., 2002; Blanton & Roweis, 2007). Важность точного вычисления k -поправок иллюстрируется тем фактом, что более ранние исследования галактик на диаграммах цвет–цвет ($NUV - r, g - r$) (Yi et al., 2005) не находят последовательности галактик, которая была бы очевидна, если бы в этих исследованиях взяли выборку галактик в узком диапазоне красных смещений.

Из-за высокой чувствительности потоков в УФ диапазоне к недавнему звездообразованию и массовой доли молодых звезд даже порядка 1%, спектральное распределение энергии от УФ до ближнего ИК диапазона в галактиках, как правило, не может быть точно представлено простым звездным населением, то есть популяцией звезд одного возраста

и металличности. Таким образом, k -поправки в УФ диапазоне не могут быть вычислены путем аппроксимации одним простым звездным населением, как это может быть сделано в оптическом и ближнем ИК диапазонах (Chilingarian et al., 2010). Другие эффекты — такие как нетепловое излучение активных ядер галактик средних светимостей или излучение в определенных спектральных линиях — также создают дополнительные трудности в УФ диапазоне. Большинство из них были учтены и успешно приняты во внимание при помощи неотрицательной факторизации матриц (Blanton & Roweis, 2007). В той же работе авторы рассчитали 5 синтетических модельных спектров, представляющих различные галактики и их компоненты.

Мы использовали двухэтапный процесс для вычисления k -поправок для наших галактик. Во-первых, мы построили подвыборку, включающую около 25 000 галактик, обнаруженных во всех 11 полосах с высоким отношением сигнал/шум у измерений в УФ диапазоне. Затем мы аппроксимировали спектры галактик, используя линейную комбинацию 5 синтетических модельных спектров (Blanton & Roweis, 2007) и закон поглощения Карделли (Cardelli et al., 1989), оставив избыток цвета $E(B - V)$ свободным параметром.

Далее мы использовали программу TOPCAT для удобной работы с таблицами (Taylor, 2005) для визуализации полученных k -поправок как функции красного смещения и различных наблюдаемых цветов, как мы это делали для оптических и ближних ИК полос (Chilingarian et al., 2010). Кроме того, мы обнаружили, что k -поправки в УФ диапазоне могут быть точно аппроксимированы полиномиальными функциями красного смещения низкого порядка и некоторых цветов. Лучшие комбинации фильтров — это $NUV - r$ и $FUV - u$ для NUV и FUV полос, соответственно, со стандартными отклонениями невязок от поверхности наилучшей аппроксимации около 0.08 зв. вел. и 0.15 зв. вел., соответственно. Затем мы использовали эти приближения для вычисления k -поправок для всех галактик в нашей выборке. Полученные таким способом приближения k -поправок в УФ диапазоне доступны в новой версии веб-сайта “Калькулятор k -поправок”¹.

3.1.2 Соотношение цвет–цвет–величина и его свойства

Мы визуально проверили объединенный набор данных $GALEX$ –SDSS в трех измерениях (M_z , $NUV - r$, $g - r$), используя программу TOPCAT, и обнаружили тонкое непрерывное распределение как синих, так и красных галактик вдоль гладкой поверхности с очень небольшим количеством выпадающих из соотношения объектов. Тогда мы аппроксимировали его двумерным полиномом низкого порядка (см. Раздел 3.1.6 с подробным описанием). Учитывая наблюдаемый диапазон цвета $g - r \sim 0.9$ зв. вел. и дисперсию невязок $g - r$, которая уменьшается от 0.07 до 0.03 зв. вел. при “покраснении” цвета $NUV - r$ от синего до красного без существенной зависимости от светимости при $M_z < -17.5$, это соотношение является самым тесным среди известных фотометрических соотношений для галактик.

При более низких светимостях дисперсия невязок возрастает. В нашем случае это можно объяснить значительно меньшим количеством объектов невысоких светимостей, вызванным спецификой отбора спектроскопических целей в обзоре SDSS, а также сравнительно низким качеством фотометрических измерений, так как карликовые галактики имеют более низкие средние значения поверхностной яркости, чем гиганты и, следовательно, их интегральная звездная величина не может быть точно измерена в относительно

¹<http://kcor.sai.msu.ru/UVtoNIR.html>

неглубоких широкопольных фотометрических обзорах, которые мы используем в настоящей работе. Дополнительный фактор, повышающий разброс — это не принятые во внимание пекулярные движения галактик внутри скоплений и групп, уменьшающие точность оценки расстояния по закону Хаббла.

Распределение галактик в трехмерном пространстве и его проекция на плоскость $(NUV - r, g - r)$ показаны на Рис. 3.1, 3.2. Выбор полосы z для оси M не так важен: соотношение ведет себя одинаково при использовании абсолютной величины в riz или в ближнем ИК. Мы выбрали полосу z из SDSS в целях демонстрации, так как диапазон светимостей в z несколько больше, чем в полосе r .

Yi et al. (2005) представил диаграмму цвет–цвет $(NUV - r, g - r)$ для галактик и звезд на их рис. 1. Однако в фотометрических измерениях галактик не была должным образом учтена k -поправка, так как авторы не располагали многополосной фотометрией, и поэтому тесной зависимости выявлено не было.

Довольно тесная связь имеется на диаграмме цвет–цвет $(NUV - r, g - r)$ для нормальных галактик, упомянутой в Schiminovich et al. (2007). Потом Salim et al. (2005) и Haines et al. (2008) делали попытку использовать как информацию из оптической области спектра, так и из ближнего УФ для изучения истории звездообразования, а также пылевых эффектов и воздействия окружающей среды на эволюцию галактик. Однако итоговый разброс объектов в этом соотношении по-прежнему остается высоким (порядка 0.15 зв. вел. в $g - r$) в связи с зависимостью обеих цветов галактик от светимости. Добавление абсолютной величины как третьего измерения уменьшает разброс в 3 раза в диапазоне абсолютных величин $(-25 < M_r < -15$ зв. вел.).

3.1.2.1 Связь с морфологией

Для того, чтобы изучить связь соотношения цвет–цвет–величина с галактической морфологией, мы использовали морфологический каталог галактик SDSS (Fukugita et al., 2007), доступный через сервис CDS VIZIER², который содержит морфологические типы для 1 465 гигантских и промежуточных по светимости галактик на $z > 0.03$ из нашей выборки. Мы видим непрерывное изменение морфологических типов вдоль поверхности в направлении $NUV - r$ с дисперсией типа по Хабблу порядка 0.7–0.8. В то же время, оптический цвет $g - r$ оказывается очень плохим морфологическим индикатором: область красной последовательности содержит галактики всех морфологических типов: от эллиптических до спиральных позднего типа Sc .

На Рис. 3.3 показана двумерная гистограмма морфология–цвет $NUV - r$. Можно видеть, что типы $S0a$ и Sa охватывают очень широкий диапазон цветов, демонстрируя сложность визуальной классификации дисковых галактик раннего типа. Это соответствует простой линейной корреляции между цветом $NUV - r$ и хаббловским типом, которая имеет следующий вид:

$$\text{TYPE} = 6.6 - 1.1 \cdot (NUV - r),$$

где значения TYPE соотносятся с хаббловским типом следующим образом: < 0 для E , 1 для $S0$, 2 для Sa , 3 для Sb , 4 для Sc , более высокие значения для Irr . Красные выпадающие галактики ($NUV - r \gtrsim 4$ зв. вел.), находящиеся над поверхностью (желтые и красные точки на Рис. 3.3) в основном поздних типов, то есть спиральные галактики, в то

²<http://vizier.u-strasbg.fr/>

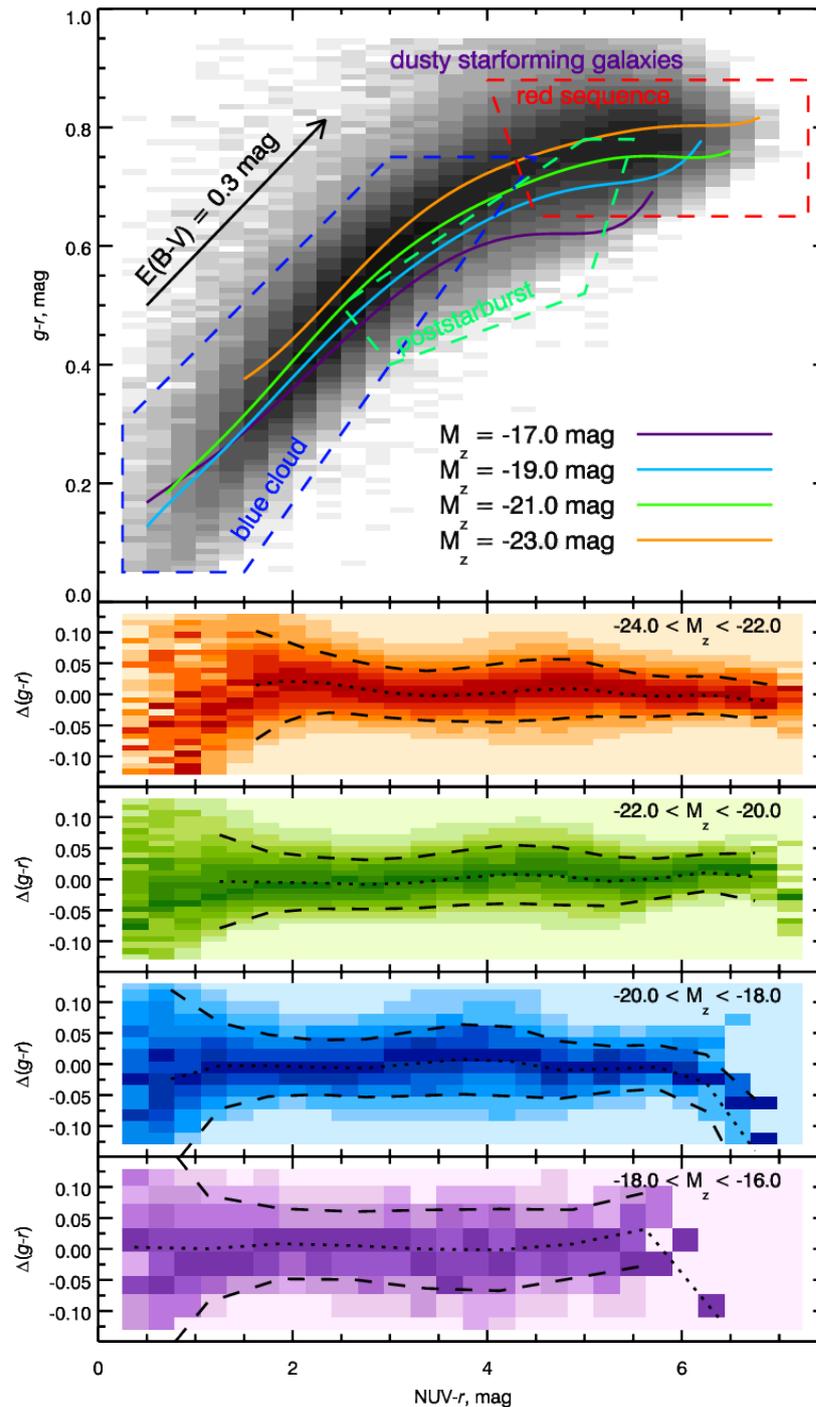


Рис. 3.1: Проекция соотношения цвет–цвет–величина на плоскость цвет–цвет. На верхней панели изображен логарифм плотности в оттенках серого со сплошными линиями, показывающими соотношения для галактик с постоянной светимостью, полученных в результате аппроксимации поверхности полиномом. Четыре нижних графика показывают невязки аппроксимации в различных диапазонах величин; они представлены в виде карт плотности с пунктирными линиями, обозначающими уровни $\pm 1\sigma$, которые нормированы на максимальное значение в каждом окне по $NUV - r$. Невязки для двух интервалов с низкой светимостью вычислялись с суммированием в более крупном окне по сравнению с более яркими галактиками, чтобы учесть меньшее количество объектов в этих диапазонах светимостей. Показаны красная последовательность, синее облако, и положения некоторых выпадающих галактик. Направление поглощения в Галактике показано вектором.

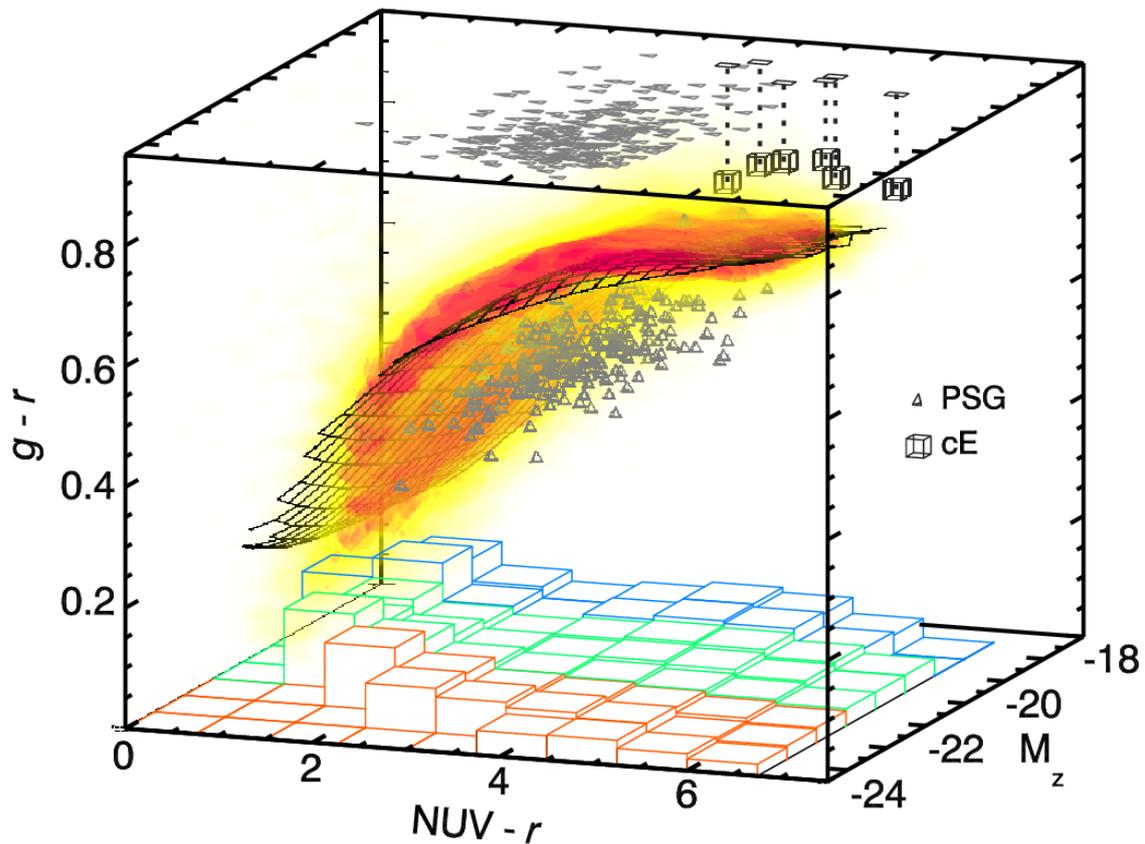


Рис. 3.2: Распределение галактик в координатах $(NUV - r, M_z, g - r)$. Трехмерный график показывает распределение плотности 225 000 галактик в координатах цвет-цвет-величина (плотность увеличивается от желтого к красному); также показана полиномиальная поверхность (в виде сетки), наилучшим образом описывающая распределение, и стандартные отклонения невязок аппроксимации, показанные в виде столбиков в плоскости $(NUV - r, M_z)$ цветами, соответствующим диапазонам звездных величин на Рис. 3.1. PSG (Goto, 2007) и компактные эллиптические галактики (cE) показаны в виде тетраэдров и кубов. На верхней поверхности графика показаны проекции их положений на плоскость $(NUV - r, M_z)$.

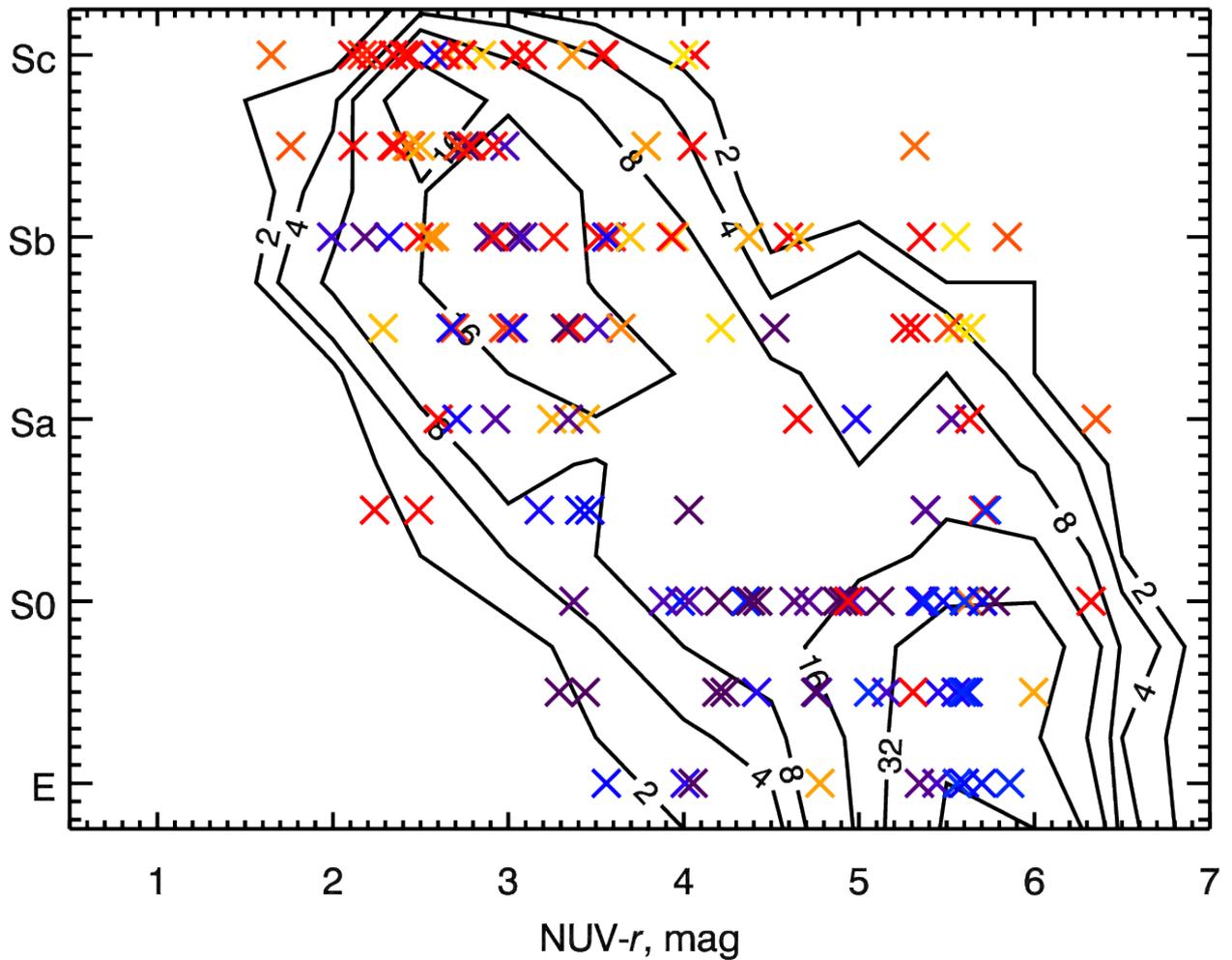


Рис. 3.3: Связь между морфологическим классом галактик, определенным визуально (Fukugita et al., 2007) и цветом $NUV - r$. Черные контуры соответствуют галактикам, которые подчиняются соотношению (цифры для подсчета), в то время как отдельные, выпадающие за 1σ , показаны в виде крестиков цветами, отражающими величину отклонения от соотношения в цвете $g - r$: от желтого до красного для галактик, находящихся выше соотношения, от синего до фиолетового для объектов под соотношением.

время как находящиеся под поверхностью (синие и фиолетовые точки на Рис. 3.3) имеют более ранние типы по сравнению с галактиками на последовательности с теми же цветами $NUV - r$.

Связь между морфологией и светимостью, предполагающая, что более яркие галактики имеют более ранние морфологические типы, гораздо более слабая и может зависеть от селекционных эффектов в нашей выборке.

3.1.2.2 Галактики, выпадающие из универсального соотношения

Мы идентифицировали несколько классов выпадающих из соотношения галактик, представляющих $\sim 2\%$ от общей выборки (см. Рис. 3.1, 3.2).

1. PSG раннего типа, выбранные из каталога галактик с сильной линией $H\delta$ (Goto, 2007) (359 совпадений с нашей выборкой) заполняют область ~ 0.15 зв. вел. под поверхностью в $g - r$, имея при этом цвета в диапазоне $3 \lesssim NUV - r \lesssim 5$ зв. вел., объясняя природу “голубых галактик раннего типа”, выпадающих из зависимости морфология–($NUV - r$), описанной выше. Это галактики с прерванной или мультимодальной историей звездообразования, последняя вспышка которого закончилась совсем недавно. Пассивно эволюционирующие молодые звездные населения краснеют намного быстрее в цвете $NUV - r$, чем в $g - r$, поэтому PSG начинают эволюционировать от синей части соотношения (справа на Рис. 3.1) и значительно позже (через 2.5–3 млрд. лет) движутся вверх, увеличивая цвет $g - r$ в сторону красной последовательности галактик.
2. Компактные эллиптические галактики (Chilingarian et al., 2009a; Price et al., 2009) находятся выше красной последовательности в соотношении цвет–цвет–величина в области низкой светимости. Несколько примеров новых сЕ галактик показаны на Рис. 3.2. Тем не менее, их цвета никогда не краснее, чем у самых массивных галактик в ярко-красном конце последовательности. Этот факт объясняется их формированием путем сильного приливного “обдирания” более массивных предшественников, скорее всего, дисковых галактик раннего типа, массивными эллиптическими галактиками или скоплением/группой доминирующих галактик. Предшественники сЕ испытывают приливное обдирание во внутренних областях скоплений галактик, когда звездообразование прекращается, потому что их межзвездная среда уже устранена лобовым давлением, возникающим из-за наличия горячего межгалактического газа (Gunn & Gott, 1972). В зависимости от предыдущей истории звездообразования, эти объекты должны либо хорошо ложиться на соотношение цвет–цвет–величина, либо оставаться чуть ниже него, в области PSG. В течение относительно быстрого приливного процесса, продолжающегося около 1 млрд. лет (Chilingarian et al., 2009a), свойства их звездных населений и цвета меняются незначительно, а масса и, следовательно, светимость может уменьшиться в 10 и более раз, следовательно, это смещает галактики с соотношения, если они находились на нем. Таким образом, красные цвета сЕ объясняются высокими звездными металличностями, унаследованных от своих предшественников, что подтверждается детальными исследованиями близлежащих сЕ (Rose et al., 2005; Chilingarian & Bergond, 2010). Там могут находиться некоторые редкие сЕ галактики среднего возраста, происходящие от PSG, чьи цвета будут

голубее, однако их пассивная эволюция быстро переместит их выше соотношения цвет–цвет–величина.

3. Запыленные галактики с протекающим звездообразованием, такие как спиральные галактики, видимые с ребра, иногда встречаются над уплощенной красной частью соотношения ($NUV - r \gtrsim 4$ зв. вел.), согласуясь также с положением выпадающих галактик позднего морфологического типа. Их положения объясняются направлением вектора экстинкции, показанным на Рис. 3.1. Если внутреннее поглощение велико, то галактика перемещается вправо-вверх на диаграмме и может в конечном итоге оказаться над красной последовательностью галактик.
4. Галактики с высоким темпом текущего звездообразования, но со все еще небольшой массовой долей молодых звезд, включая образованные в результате недавнего или происходящего в настоящую эпоху слияния галактик, могут иметь весьма специфические цвета из-за сильных запрещенных эмиссионных линий и/или большого количества пыли.
5. AGN, имеющие узкие линии в спектре и низкий вклад ядер в суммарную светимость в оптическом диапазоне и, следовательно, классифицируемые как нормальные галактики программным обеспечением для потоковой обработки SDSS, могут иметь сильный избыток света в УФ. Мы не применяли какой-либо фильтрации наших данных, чтобы исключить эти объекты, поэтому наша выборка может быть немного “засорена” ими на уровне не выше одного процента.
6. “Нефизические” объекты — галактики, случайно проецирующиеся на звезды ближнего плана или на другие галактики на различных красных смещениях — создают выбросы из соотношения, которые могут быть расположены практически в любой части пространства параметров, за исключением экстремально красной области в цвете ($NUV - r$) и экстремально синей в ($g - r$).

3.1.3 Обсуждение

3.1.3.1 Эффекты эволюции звездного населения и внутреннего поглощения

Распределение галактик в пространстве цвет–цвет–величина определяется тремя факторами: 1) звездной массой, 2) звездообразованием и химической историей обогащения, включая протекающее звездообразование, и 3) внутреннее поглощение. Таким образом, должна существовать связь между положениями галактик на диаграмме и свойствами их звездных населений. Мы аппроксимировали подвыборку из 133 000 спектров из SDSS DR7 моделями простых звездных населений (SSP) с использованием NBURSTS (Chilingarian et al., 2007b,a) и, следовательно, получили возраста и металличности эквивалентных простых звездных населений. Метод NBURSTS включает мультипликативный полиномиальный континуум, который, в свою очередь, включает ошибки калибровки потока и делает аппроксимацию нечувствительной к внутреннему поглощению в галактиках. Заметим также, что спектры SDSS, полученные с широкой круглой апертурой $3''$, не могут отображать галактики целиком в случае сильно протяженных объектов с заметными градиентами свойств звездных населений. Тем не менее, мы можем сделать некоторые качественные выводы.

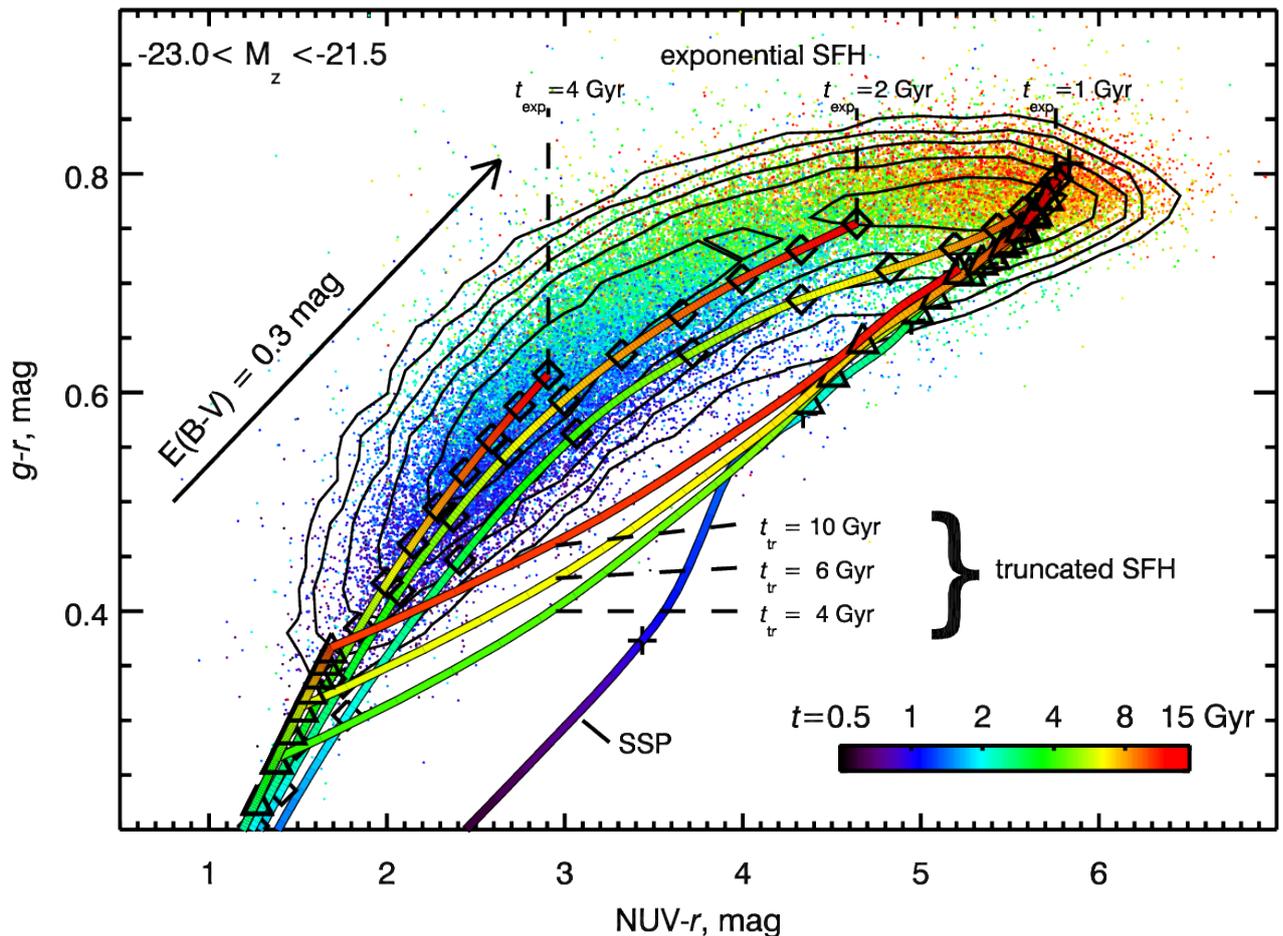


Рис. 3.4: Связь между положением галактик на диаграмме цвет–цвет–величина и их эквивалентом простого звездного населения. Небольшая часть соотношения в узком диапазоне светимостей ($-23 < M_z < -21.5$ зв. вел.) показана в проекции цвет–цвет. Средние возраста звездных населений 40 000 галактик, полученные путем аппроксимации оптических спектров из SDSS DR7, имеют связь с видимым на диаграмме цветом. Эволюционные треки моделей звездных населений, не учитывающих внутреннее поглощение, имеющие солнечную металличность и различные истории звездообразования, нарисованы поверх (см. текст). Цвета треков соответствуют возрастам синтетических галактик, сформировавшихся 12 млрд. лет назад, штрихи на треках проведены через каждые 1 млрд. лет. Цвета $NUV - r$ в моделях эмпирически исправлены на -0.7 зв. вел. (см. текст).

Даже в случае чрезмерно упрощенных параметров SSP-эквивалента, мы наблюдаем сильную связь между средними свойствами звездного населения галактик и их положением в пространстве параметров $(M_z, NUV - r, g - r)$. Галактики, находящиеся близко к поверхности наилучшего приближения, демонстрируют умеренный градиент металличности как функции светимости, и почти не имеют изменений в плоскости цвет-цвет, за исключением синего конца последовательности ($NUV - r \lesssim 2.5; g - r \lesssim 0.5$), где металличность быстро уменьшается. Соотношение светимость-металличность для галактик раннего типа, как известно, отвечающая за наклон соотношения “оптический цвет-величина” (Kodama & Arimoto, 1997), аналогично вызывает наклон поверхности цвет-цвет-величина в красной части.

Наблюдаемые возрастные эффекты в проекции цвет-цвет являются более важными. При промежуточных и высоких светимостях, возраст плавно увеличивается вдоль последовательности от ~ 500 млн. лет в $NUV - r \approx 1.5, g - r \approx 0.3$ до 13 млрд. лет на красном конце. Для галактик слабой светимости возраста самых старых SSP-эквивалентов красных галактик падают до 10 млрд. лет в $M_z = -18$ зв. вел., согласуясь с известной антикорреляцией между средними возрастами звездных населений со светимостью карликовых эллиптических галактик в скоплениях (van Zee et al., 2004; Michielsen et al., 2008; Chilingarian et al., 2008; Chilingarian, 2009; Smith et al., 2009a,b). Из-за того же эффекта верхний “край” красной последовательности на CMD $(NUV - r; M_z)$ сильно наклонен на $M_z > -19$ зв. вел.

При всех светимостях имеется заметный градиент возраста поперек последовательности, то есть большие показатели цвета $g - r$ соответствуют старым населением. Кроме того, дисперсия оценок возраста ($\log t$) возрастает при движении в сторону синего цвета со значениями, которые совершенно не коррелируют с цветами на синем конце последовательности, соответствующем возрастам звезд $t \lesssim 500$ млн. лет.

На Рис. 3.4 показан срез по светимостям ($-23.0 < M_z < -21.5$ зв. вел.) выборки, имеющей среднее значение металличности SSP-эквивалента $[Fe/H] = -0.02$ dex ($\langle [Fe/H] \rangle = 0.13$ dex) и среднее красное смещение $z = 0.11$ ($\langle z \rangle = 0.03$), соответствующее времени, затрачиваемому светом на преодоление, ~ 1.4 млрд. лет. В этом диапазоне красного смещения, $3''$ собирают значительную часть света от галактик. Качественное поведение средних возрастов звездных населений при других светимостях аналогичное.

Мы также представляем эволюционные треки для галактик, имеющих различные типы истории звездообразования. Модели были построены для цветов $NUV - r$ на основе моделей PEGASE.2 (Fioc & Rocca-Volmerange, 1997), вычисленных с использованием синтетической звездной библиотекой BaSeL низкого разрешения (Lejeune et al., 1997), а также для цветов $g - r$ с использованием другого семейства моделей звездных населений (Vazdekis et al., 2010), вычисленных при помощи большой эмпирической библиотеки спектров среднего разрешения с телескопа Исаака Ньютона (MILES, Sánchez-Blázquez et al., 2006). Сочетание этих двух семейств моделей звездных населений имеет важное значение, так как Maraston et al. (2009) показали, что разница между предсказанными и наблюдаемыми цветами красных галактик в фотометрической системе SDSS было обусловлено характером синтетических звездных спектров, используемых для построения моделей звездных населений. Предлагаемое решение заключается в использовании модели, основанной на эмпирических звездных спектрах. Звездная библиотека MILES, которая была использована для построения представленных здесь моделей, имеет наилучшее покрытие

параметров звездных атмосфер по сравнению со всеми другими существующими опубликованными источниками, кроме библиотеки высокого разрешения ELODIE, которая, однако, имеет слишком узкое покрытие по длинам волн, делая вычисление цветов с участием g и r невозможным. Цвета $NUV - r$ для всех моделей, показанные на Рис. 3.4, были эмпирически скорректированы на -0.7 зв. вел. Это смещение, вероятно, имеет ту же природу, которая описывается в работе [Maraston et al. \(2009\)](#), однако к данному моменту нет моделей, основанных на эмпирических звездных спектрах, доступных в NUV.

Треки, показанные на Рис. 3.4, были вычислены следующим образом. Во-первых, мы вычислили цвета и светимости простых звездных населений, имеющих $[Fe/H] = 0$ dex, с помощью PEGASE.2 для возрастов 30, 50, 100 млн. лет и далее до 17 млрд. лет с шагом 50 млн. лет. Во-вторых, мы вычислили цвета $g - r$ из моделей, основанных на MILES, и интерполировали их к той же возрастной сетке. Полученный SSP-трек показан на Рис. 3.4 - его “молодая” часть сильно смещена от наблюдаемого распределения галактик в сторону красного цвета $NUV - r$, соединяясь потом с красной последовательностью при возрастах $t > 5$ млрд. лет. В-третьих, мы проинтегрировали рассчитанные светимости SSP в различных фотометрических полосах вплоть до 12 млрд. лет с использованием двух типов звездообразования: а) с экспоненциально замедляющейся скоростью образования звезд с тремя характерными временными шкалами $T_{\text{exp}} = 1, 2, 4$ млрд. лет; б) с резко прерывавшимся звездообразованием: постоянный темп звездообразования от эпохи формирования галактик ($t_{\text{tr}} = 4, 6, 10$ млрд. лет) до данного момента времени с последующим резким прекращением звездообразования и дальнейшей пассивной эволюцией.

Наши эволюционные треки галактик проще, чем у реальных галактик, потому что они не включают в себя внутреннюю эволюцию металличности и другие процессы, такие как обогащение газом из филаментов или спутников, слияния галактик и т.д., однако, мы можем использовать их для некоторых качественных выводов:

1. SSP-модели с низкими и промежуточными возрастными ($t < 5$ млрд. лет) не имеют наблюдаемых галактик, что указывает на то, что (очевидно) ни одна из массивных галактик в нашей выборке не сформировалась недавно за короткий срок. Тем не менее, они довольно хорошо согласуются с положением старейших галактик красной последовательности.
2. Основная последовательность цветов может быть объяснена наличием галактик, образованных сразу после Большого взрыва (около 12 млрд. лет назад, принимая во внимание среднее красное смещение нашей выборки) и имеющих различные типы истории звездообразования. В ее основной части наклон соотношения цвет-цвет и направление внутреннего поглощения превосходно совпадают друг с другом.
3. Галактики, имеющие постоянный темп звездообразования, будут обрываться рядом с нижним синим концом последовательности и могут быть перемещены вправо-вверх вдоль нее за счет внутреннего поглощения. Семейство с экспоненциально замедляющимися темпами звездообразования и с различными характерными временными шкалами формируют изогнутую последовательность, хорошо соответствующую наблюдаемой связи. Темп эволюции цвета $NUV - r$ на уровне $3 < NUV - r < 5$ зв. вел. антикоррелирует с характерной временной шкалой (также см. [Wyder et al. \(2007\)](#) для подобного графика в пространстве цветов ($NUV - r, u - r$) без какого-либо отбора по светимостям). Модели для более низких металличностей хорошо воспроизводят

соотношение цвет–цвет при более низких светимостях, предполагая универсальность историй звездообразования с экспоненциальным затуханием. Мы подчеркиваем, что этот тип звездообразования не единственный, который способен объяснить наблюдаемое распределение галактик в пространстве цвет–цвет–величина, однако, это самая простая модель с наименьшим числом свободных параметров по сравнению с другими альтернативами (например, модель с несколькими вспышками звездообразования или модель, включающая экспоненциальное затухание с дополнительной вспышкой).

4. Галактики с резко прервавшимся звездообразованием имеют очень короткий переходный этап на пути к области красной последовательности продолжительностью около 1 млрд. лет после прекращения звездообразования, в то время как их цвет $NUV - r$ сильно краснеет на $\simeq 3$ зв. вел., а изменение $g - r$ остается на уровне 0.2 зв. вел. Положение PSG ниже главной последовательности цветов хорошо сочетается с этой переходной фазой, а их редкость согласуется с короткой продолжительностью перехода.
5. Факт наличия пыльных галактик со звездообразованием, находящихся выше последовательности при красных цветах $NUV - r$, также объясняется: они перемещаются вправо-вверх из последовательности в направлении вектора поглощения.
6. Формы эволюционных треков для галактик с экспоненциально затухающим звездообразованием ясно показывают, что эволюция большинства галактик находится в согласии с соотношением в течение 6–8 млрд. лет. *Таким образом, можно было бы ожидать слабую эволюцию формы представленного соотношения цвет–цвет–величина, по крайней мере до красных смещений $z \sim 0.9$, хотя распределение галактик на нем будет эволюционировать. Это говорит о том, что это уникальный поисковый инструмент для далеких скоплений галактик с использованием изображений в широкой полосе giJ .*

3.1.3.2 Соотношение цвет–цвет–величина для других пар цветов

Мы нашли аналогичные фотометрические соотношения в других цветовых парах, однако они более сильно зависят от особенностей наблюдений и явлений, связанных с эволюцией галактик. Соотношения цвет–цвет–величина, включающие только оптические цвета, очень тесны из-за сильных вырождений между цветами, но по той же причине они имеют очень ограниченные астрофизические приложения. Например, в пространстве $(u - r, g - r, M_r)$ значение $u - r$ близко к $\sim 2 \times (g - r)$ при всех светимостях, т.е. они линейно зависимы для большинства галактик, следовательно, практически отсутствует информация, даваемая добавлением третьего измерения.

3.1.3.2.1 Другие комбинации цветов в ближнем УФ и оптическом диапазонах

Соотношение цвет–цвет–величина сохраняется, когда используются другие оптические цветовые комбинации вместе с NUV при условии, что имеется достаточный диапазон длин волн в оптическом цвете, чтобы различать красные и синие галактики. То есть такие цвета, как $u - r, g - i, g - z, r - z$, но не $r - i$ и $i - z$. В Разделе 3.1.7 показаны графики, аналогичные Рис. 3.1, построенные для различных пар цветов.

Фотометрические измерения в полосе u имеют относительно низкое качество по сравнению с g и r , поэтому невязки в соотношении в координатах $(NUV - r, u - r, M_r)$ примерно в четыре раза больше, чем в $(NUV - r, g - r, M_r)$. Дополнительным фактором увеличивающим разброс является важное различие между направлением вектора поглощения и наклоном синей части соотношения в плоскости $(NUV - r, u - r)$ по сравнению с $(NUV - r, g - r)$, повышающим разброс при $NUV - r < 4$ зв. вел.

Соотношение в $(NUV - r, g - i, M_i)$ имеет невязки аппроксимации, которые примерно на 50% выше, чем в $(NUV - r, g - r, M_r)$, хотя можно было бы ожидать, что они будут похожи с учетом качественной фотометрии в полосах i и r и одинаковой зависимостью этих цветов от эволюции звездного населения. Мы объясняем это большими ошибками расчета k -поправок в полосе i , связанными с широким диапазоном интенсивности эмиссионной линии $H\alpha + [NII]$ в наших галактик. В нашей выборке, за исключением объектов с очень низким красным смещением ($z < 0.03$), в наблюдаемых рамках полосы i может быть засорение эмиссионной линией $H\alpha + [NII]$, которая сильно меняется от галактики к галактике. Тем не менее, в процессе вычисления k -поправок мы опираемся на некоторое среднее значение интенсивности линии, даваемое модельными спектрами [Blanton & Roweis \(2007\)](#). Таким образом, объекты с очень слабыми или очень сильными эмиссионными линиями будут иметь наблюдаемые цвета $r - i$ краснее или голубее, чем те, которые предсказываются моделями и которые были включены в полиномиальную 2D-аппроксимацию k -поправок. Следовательно, значения k -поправки в полосе i могут быть неточными. Несмотря на это и учитывая на $\sim 50\%$ больший диапазон цвета $r - i$ по сравнению с $g - r$, соотношение в этом цветовом пространстве может быть использовано таким же образом, как и описанное в Разделе 3.

Комбинация цветов $(NUV - z, g - z)$ представляет собой еще одну хорошую альтернативу $(NUV - r, g - r, M_r)$, однако с разбросом на $\sim 80\%$ большим из-за более низкого фотометрического качества в полосе z по сравнению с r в SDSS. Примечательными особенностями этого соотношения являются: а) значительно более сильный градиент светимости в красной области последовательности и б) меньшие, чем в плоскости $(NUV - r, g - r)$, значения невязок в синей части соотношения, что вызвано еще лучшим совпадением направления изменения цвета из-за эволюции звездного населения и внутреннего поглощения.

Пара цветов $(NUV - z, r - z)$ плохо подходит для этой цели из-за схожего поведения r и z , обремененных относительно высокими фотометрическими ошибками в полосе z . Таким образом, несмотря на то, что диапазон цвета $r - z$ почти такой же, как и в $g - r$, дисперсия невязок заметно выше, что усложняет использование соотношения цвет-цвет-величина в координатах $(NUV - z, r - z, M_z)$.

3.1.3.2.2 Комбинации с цветами из далекого УФ и близкого ИК диапазонов

Измерения в полосе *GALEX FUV* имеют в среднем гораздо худшее качество, чем *NUV* из-за низкой чувствительности детектора, а также более низких потоков от старых галактик и галактик промежуточного возраста. Тем не менее, мы все еще можем увидеть подобное соотношение цвет-цвет-величина, если мы используем величины в *FUV* вместо *NUV*, хотя и с более высокими значениями невязок, особенно в части соотношения с низкими светимостями, где средняя поверхностная яркость галактик уменьшается. Рассчитанные

k -поправки также имеют большие ошибки в FUV , а также дополнительный разброс дают эффекты внутренней экстинкции.

Область красной последовательности в проекции цвет–цвет простирается от ~ 2.5 зв. вел. в $NUV - r$ до ~ 4 зв. вел. в $FUV - r$ за счет еще более высокой чувствительности FUV -цветов к малым долям молодых звезд. Тем не менее, все комбинации с участием величины в FUV чувствительны к увеличению УФ-потока в старых галактиках раннего типа (Code, 1969; Bertola et al., 1982), что, вероятно, вызвано звездной эволюцией (Yi et al., 1997), что приводит к неоднозначности соотношения в области красной последовательности. То есть после некоторой “точки поворота” (7–8 млрд. лет) цвет $FUV - r$ становится голубее, когда звезды стареют.

Мы использовали фотометрию UKIDSS, чтобы проверить наличие фотометрических соотношений в комбинациях с участием цветов из оптического и ближнего ИК диапазона. Ни одна из комбинаций, кроме ($NUV - Y$, $g - Y$, M_Y) не дает такой тесной связи, как той, которую мы обнаружили в оптических цветах: невязки аппроксимации порядка 0.2 зв. вел. или больше.

Известно (см., например, Maraston, 2005), что цвета JHK чувствительны к AGB звездам, представленным в звездных населенных промежуточного возраста, а также, что при определенном возрасте (1–2 млрд. лет) цвета между оптическим и ближнем ИК диапазонами ($g - H$ или $r - H$), как правило, краснее, чем цвета старых звездных населений на несколько десятых долей величины. Тогда, учитывая гораздо больший диапазон, например, у $NUV - H$, чем у $r - H$, этот избыток будет значительным, и он будет сильно зависеть от истории звездообразования данной галактики, поэтому галактики с промежуточными цветами $NUV - H$, имеющие различные типы истории звездообразования, могут иметь существенно отличающиеся цвета $g - H$ или $r - H$, “размазывая” часть соотношения от промежуточных цветов до красных, за исключением самого красного конца. Кроме того, цвета между оптическим и ближним ИК диапазонами более чувствительны к металличности, чем оптические. Следовательно, естественный относительно небольшой размах галактик по металличностям при данной светимости даст большой разброс их цветов $g - H$ или $r - H$. Из-за фазы AGB для прерванной истории звездообразования эволюция цвета в плоскости ($NUV - H$, $g - H$) также будет более сложной, чем в оптическом цвете, и она будет сильно зависеть от времени прерывания.

3.1.3.3 Оценка красного смещения по трем фотометрическим измерениям

Этот раздел посвящен независимому математическому доказательству существования тесного соотношения цвет–цвет–величина для УФ и оптического диапазонов. Подробное обсуждение методики и ее практического применения к существующим данным фотометрических обзоров представлены в отдельном разделе.

Математическим следствием соотношения и гладких зависимостей k -поправок от наблюдаемых цветов является возможность существования однозначной функциональной зависимости красного смещения от наблюдаемых цветов и звездных величин галактик. Такая зависимость, если она будет найдена, подтвердит наличие универсального соотношения цвет–цвет–величина. Важно, что она возникает из-за ненулевой кривизны поверхности цвет–цвет–величина и существенно разных распределений цвет–величина для двух используемых цветов. В вырожденном случае, например, ($u - r$, $g - r$, M_r), где два распределения цвет–величина весьма близки к линейной зависимости и, следовательно,

галактики находятся на почти плоской поверхности, фотометрическое определение красного смещения становится невозможным.

Для последующих вычислений мы выделили две подвыборки из основной выборки галактик, увеличив диапазон по красным смещениям вплоть до $z = 0.52$ (270 016 объектов), используя их цвета $g - r$, скорректированные за k -поправки, *красные галактики* ($g - r > 0.73$ зв. вел., 77 070 объектов) и *голубые галактики* ($g - r < 0.7$ зв. вел., 167 157 объектов), за исключением небольшой доли объектов в “зеленой долине”. Эти выборки были снова разделены на две группы: объекты с малым красным смещением ($z \leq 0.25$) и большим красным смещением ($z > 0.25$); первая часть содержала в себе 214 770 объектов (32 317 *красных* + 160 310 *синих*), а вторая 56 275 (45 365 *красных* + 7 227 *синих*). Здесь большинство голубых галактик в выборке с высоким красным смещением взяты из глубоких изображений *SDSS Stripe 82* (Adelman-McCarthy et al., 2006) и доля галактик между *синими* и *красными* галактиками отчетливо демонстрирует, что алгоритм выбора объекта SDSS тяготеет к ярким красным галактикам на промежуточных и высоких красных смещениях.

Мы аппроксимировали красное смещение галактик, полученное из спектроскопии, в нашей подвыборке с низким красным смещением трехмерной полиномиальной функцией наблюдаемых r , $NUV - r$, а $g - r$, и попытались восстановить фотометрические красные смещения z_{phot} (Рис. 3.5). Дисперсия $\sigma(\Delta(z))$ невязок $\Delta(z) = (z_{\text{phot}} - z_{\text{spec}})/(1 + z_{\text{spec}})$ порядка 0.025, а доля сильно вылетающих из соотношения галактик (определяется как доля объектов с $\Delta(z) > 3\sigma(\Delta(z))$) $\eta = 0.8\%$ сопоставима с наилучшими имеющимися методами фотометрического определения красного смещения, использующих многополосную фотометрию от FUV до ближнего ИК, сложные математические и статистические алгоритмы (Way & Srivastava, 2006) и дополнительную морфологическую информацию (Wray & Gunn, 2008). Для *красных* и *синих* галактик невязки и доли вылетающих галактик следующие: $\sigma(\Delta(z))_{\text{red}} = 0.021$, $\eta_{\text{red}} = 2.2\%$ и $\sigma(\Delta(z))_{\text{blue}} = 0.024$, $\eta_{\text{blue}} = 0.7\%$.

Следовательно, при более высоких красных смещениях, когда длины волн, попадающие в фильтр *NUV*, сдвигаются в оптическую область, должна быть возможность определить фотометрические красные смещения с хорошей точностью с помощью широкополосной фотометрии $u - r - z$, $g - r - z$, или $g - i - Y$. Мы проверили эту гипотезу с нашей подвыборкой с высоким красным смещением путем подгонки их красных смещений как функции наблюдаемых SDSS (z , $u - z$, $r - z$) и получили невязки, имеющие дисперсию $\sigma(\Delta(z)) = 0.036$ и долю вылетающих объектов $\eta = 1.1\%$. Для *красных* и *синих* галактик невязки и доли вылетающих галактик следующие: $\sigma(\Delta(z))_{\text{red}} = 0.034$, $\eta_{\text{red}} = 1.0\%$ и $\sigma(\Delta(z))_{\text{blue}} = 0.047$, $\eta_{\text{blue}} = 1.2\%$. Эти относительно большие ошибки связаны в основном с низким качеством петросьяновской звездной величины в полосе u , имеющей типичные ошибки порядка 0.3 зв. вел. при больших красных смещениях галактик. Обращаем внимание, что если использовать модельные звездные величины вместо петросьяновских, соотношение становится намного теснее для *красной* подвыборки ($\sigma(\Delta(z))_{\text{red}} = 0.027$), однако оно почти пропадает для *синих* галактик, чьи модельные величины в полосе u не соответствуют их реальным фотометрическим свойствам из-за профиля яркости, сильно отличающегося от экспоненциального или вокулеровского.

Показанная возможность точного вычисления фотометрического красного смещения как для синих, так и для красных галактик с малой долей отсеченных галактик по трем фотометрическим измерениям, включающим цвета из оптического и ближнего УФ

диапазона, доказывает существование тесного универсального соотношения цвет–цвет–величина для нормальных галактик всех типов, а не только для объектов красной последовательности.

Мы сравнили эти вычисления с существующими методами определения фотометрических красных смещений. Используя код “LE PHARE” для фотометрического определения красного смещения в сочетании с процедурой оптимизации моделей и применяя байесовские методы, основываясь на выборке галактик с 9-ю индивидуальными фотометрическими измерениями с качеством, схожим с нашим, Ilbert et al. (2006) нашел дисперсию $\sigma(\Delta(z)) = 0.025$ и $\eta = 1.9\%$ (хотя мы подчеркиваем, что авторы в их статистике отбрасывали объекты, не попадающие в диапазон 6σ). Mobasher et al. (2007) проанализировал эффективность различных кодов для определения фотометрических красных смещений на наборе данных, который содержит 16 фотометрических измерений для каждого спектра. Наилучший результат в их исследовании достигается с использованием собственного метода: дисперсии невязок всего лишь $\sigma(\Delta(z)) = 0.033$, а $\eta = 2.2\%$. База данных SDSS дает несколько оценок фотометрического красного смещения, полученное методом, описанным в Adelman-McCarthy et al. (2007). Мы извлекли три из них: 1) полученные из сравнения наблюдаемых цветов галактик с полуэмпирическим опорным набором (далее *photoz*) из таблицы *photoz*, 2) оценки, полученные нейронной сетью на основе звездных величин галактик (“D1”) и 3) цвета (“CC2”) из таблицы *photoz2*. В целом они выполняются достаточно хорошо для *красных* галактик в нашей подвыборке с большими красными смещениями ($\sigma(\Delta(z))_{\text{red,photoz}} = 0.020$ и $\eta_{\text{red,photoz}} = 1.7\%$, $\sigma(\Delta(z))_{\text{red,D1}} = 0.020\%$ и $\eta_{\text{red,D1}} = 1.6\%$, $\sigma(\Delta(z))_{\text{red,CC2}} = 0.023$ и $\eta_{\text{red,CC2}} = 1.7\%$). Тем не менее, подобно нашему подходу, качество хуже для *синих* галактик: $\sigma(\Delta(z))_{\text{blue,photoz}} = 0.042$ и $\eta_{\text{blue,photoz}} = 3.4\%$, $\sigma(\Delta(z))_{\text{blue,D1}} = 0.039$ и $\eta_{\text{blue,D1}} = 2.0\%$, $\sigma(\Delta(z))_{\text{blue,CC2}} = 0.044$ и $\eta_{\text{CC2}} = 1.7\%$. Следует иметь в виду, что 1) эти методы используют много дополнительной информации (например, морфология, размер и т.д.) и 2) все галактики из спектроскопической выборки SDSS на самом деле представляют собой тестовую выборку для этих методов, поэтому эти числа нуждаются в проверке.

Отметим также, что поскольку определение красного смещения по трем фотометрическим измерениям является простым математическим следствием соотношения цвет–цвет–величина, то галактики, у которых фотометрические красные смещения определяются плохо, являются объектами, выпадающими из соотношения — это PSG, запыленные галактики со звездообразованием и AGN.

Подводя итог, по сравнению с существующими методами фотометрического определения красного смещения, представленный метод требует в 3–5 раз меньше наблюдательного времени (из-за того, что измерения отдельных галактик не требуется делать в большом количестве фотометрических полос), при этом он в состоянии дать красные смещения для больших выборок галактик на том же или более высоком уровне точности. Кроме того, предлагаемая полиномиальная оценка значительно проще с методологической точки зрения, чем метод минимизации χ^2 с байесовской априорной информацией, используемый в обычных кодах определения фотометрического красного смещения.

Есть два главных недостатка нашего подхода: 1) он не является точным для нетипичных галактик, т.е. выпадающих из соотношения цвет–цвет–величина; 2) он работает только для тех областей пространства параметров, где имеется достаточно спектральных измерений красного смещения. Последнее означает, например, что можно выйти за

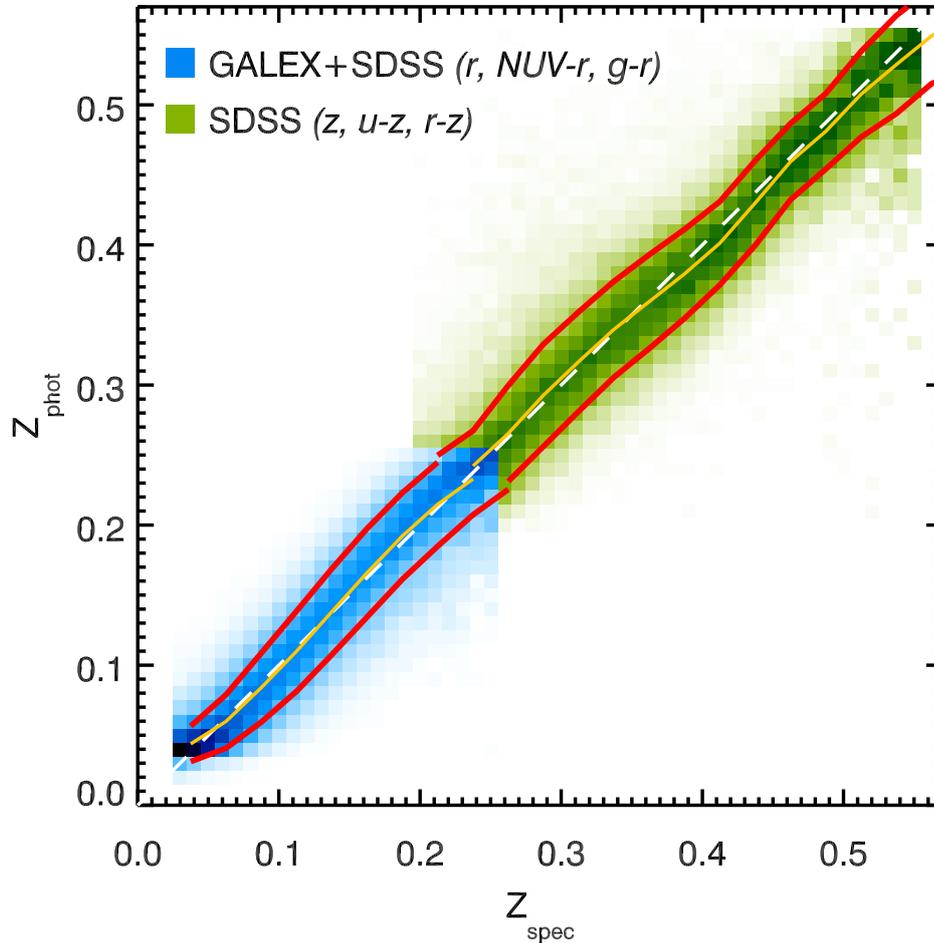


Рис. 3.5: Восстановление расстояний до галактик по трем фотометрическим измерениям. Карты плотности фотометрического красного смещения галактик, полученного путем аппроксимации их спектроскопических красных смещений как полиномиальной функции трех параметров: наблюдаемой звездной величины и двух наблюдаемых цветов, скорректированных за поглощение в Галактике. Синяя часть графика отображает выборку из 214 000 галактик с низким красным смещением ($0.03 < z < 0.25$) с фотометрическими измерениями в NUV (*GALEX*), *g* и *r* (*SDSS*). Зеленая часть графика - выборка 56 000 галактик с промежуточными красными смещениями ($0.2 < z < 0.52$), фотометрические красные смещения которых были вычислены с использованием фотометрических данных *u*, *r* и *z* из *SDSS DR7*. Красная и синяя сплошные линии обозначают медианное значение z_{phot} и стандартное отклонение невязок $(z_{phot} - z_{spec})/(1 + z_{spec})$ для красных и синих галактик соответственно.

рамки предельной звездной величины спектральной выборки SDSS, сохраняя заявленную точность нашего метода, если используется внешний источник спектрального красного смещения для калибровки функциональной связи для работы с фотометрией SDSS на слабых звездных величинах. Но без такой калибровки фотометрические оценки красных смещений для слабых галактик будут неправильными.

Концептуально, представленная многомерная полиномиальная аппроксимация напоминает обучающиеся искусственные нейронные сети, иногда используемые для фотометрического определения красного смещения (например, D’Abrusco et al., 2007), хотя основной механизм отличается. В обоих случаях существует нелинейное преобразование (трехмерная полиномиальная функция в нашем случае или последующие многоуровневые сигмовидные преобразования в случае нейронных сетей) некоторых входных измерений при оценке выходного красного смещения. Коэффициенты преобразования настроены (“обучены”) таким образом, чтобы работать как можно лучше для опорного (“тестового”) набора данных. Таким образом, оба метода в отличие от методов χ^2 нечувствительны к систематическим ошибкам входных данных. То есть “модели” построены из самого набора данных и устойчивы к его конструкционным проблемам.

3.1.4 Резюме

Мы представили универсальное тесное соотношение цвет–цвет–величина в оптических и ближних УФ фильтрах с большим числом неактивных галактик всех морфологических типов, охватывающих по крайней мере 8 звездных величин по светимости, из выборки с 225 000 галактиками низкого красного смещения ($z < 0.27$), наблюдавшихся в обзорах SDSS и *GALEX*. Особый случай представляет собой соединение оптического цвета $g - r$ с цветом $NUV - r$ и величиной M_r , которую мы аппроксимировали полиномиальной поверхностью низкого порядка с невязками $\sim 0.03 - 0.07$ зв. вел. во всем диапазоне светимостей ($-23.5 < M_r < -15.5$ зв. вел.) и цвета ($0 < NUV - r < 7.5$ зв. вел.).

Мы показали, что существует сильная корреляция между цветом $NUV - r$ и морфологией галактик, в то время как для оптического цвета $g - r$ эта корреляция значительно слабее. Мы определили несколько классов выбросов из соотношения, составляющих около 2% от общей численности галактик выборки, и объяснили природу этих выбросов, самым важными из которых являются редкие компактные эллиптические и PSG E+A галактики.

Мы сделали моделирование звездных населений и показали, что соотношение может быть объяснено наличием галактик, имеющих постоянное и экспоненциально затухающее звездообразование, в то время как галактики с резко прервавшимся звездообразованием с быстрой эволюцией цвета после прекращения звездообразования объясняют свойства выпадающих E+A-галактик. Наиболее важным выводом является предсказанная слабая зависимость формы соотношения цвет–цвет–величина от красного смещения вплоть до $z \sim 0.9$, что позволяет использовать его для поиска далеких скоплений галактик по изображениям в трех широких фотометрических полосах.

Существование такой жесткой фотометрической связи предполагает возможность высокоточной оценки фотометрического красного смещения, используя только три фотометрических измерения, что мы также продемонстрировали. Наш эмпирический фотометрический метод с использованием минимального входного набора данных по красным смещениям имеет качество, сравнимое или лучшее, чем большинство опубликованных методов z_{phot} , причем его гораздо проще реализовать.

Подробная астрофизическая интерпретация описанных фотометрических соотношений еще предстоит сделать. Тем не менее, они могут быть использованы в качестве мощного инструмента классификации галактики только на основе их комплексной фотометрии, а также в качестве инструмента для поиска представителей редких типов галактик в фотометрических выборках галактик.

3.1.5 Проверка результата

Два фактора могут в принципе привести к неправильному соотношению цвет–цвет–величина, представленному в данной работе: а) отбор выборки смещен в сторону определенных цветов, соответствующих описанной поверхности, б) серьезные недостатки в вычислении k -поправки искусственно приводят большинство галактик к соотношению.

Поскольку мы не применяли селекции к спектроскопической выборке галактик SDSS DR7 на основе их морфологии, цветов, размеров и т.д., а *GALEX* является обзором полного неба, предоставляющим фотометрическую информацию для всех обнаруженных объектов, единственным источником эффектов селекции может быть спектроскопическая выборка SDSS. Соответствующие алгоритмы исчерпывающе описаны в работе (Eisenstein et al., 2001; Strauss et al., 2002), и мы не видим причин для них, чтобы использовать какие-либо особенные процедуры при селекции галактик, которые могут привести к созданию “пустых” регионов в пространстве параметров цвет–цвет–величина. Это хорошо иллюстрируется широким и хорошо заполненным распределением цвета галактик SDSS (Strateva et al., 2001; Blanton et al., 2003a; Baldry et al., 2004) и исследованиями функций светимости галактик на основе SDSS (Blanton et al., 2003b).

Для того чтобы проверить наличие потенциальных проблем при расчетах k -поправок, мы провели два специальных теста. Для этого мы выбрали две подвыборки галактик в узких диапазонах красного смещения, $\Delta z_1: 0.03 < z_1 < 0.05$ (24 319 галактик) и $\Delta z_2: 0.08 < z_2 < 0.10$ (37 303 галактик). Мы отобрали выборку со сравнительно низкими красными смещениями, потому что алгоритм выбора цели SDSS имеет ограничение величины $r = 17.77$ зв. вел. в пределах $3''$ апертуры, поэтому галактики на более высоких красных смещениях плохо заполняют ось светимости пространства параметров.

Первый тест заключался в сравнении распределений цвет–цвет–величина в двух разных подвыборках. В случае проблем с вычислением k -поправок, можно было бы ожидать систематические различия между двумя подвыборками, которых мы не обнаружили (см. Рис. 3.6а для вида соотношения “с ребра”).

Второй тест должен был проделать то же самое, но с без коррекции подвыборок за k -поправку. По той причине, что k -поправки существенно не изменяются в пределах подвыборки с узким диапазоном красных смещений, но меняются между подвыборками, можно было бы ожидать, что получится два тесных соотношения цвет–цвет–величина качественно напоминающее соотношение для подвыборок, где величины скорректированы за k -поправку, но с некоторыми количественными различиями, такими как наклон синего облака или другое положение красной последовательности. Мы получили результат, в точности совпадающий с предсказанным интуитивно. Виды “с ребра” соотношений, где не была учтена k -поправка, представлены на Рис. 3.6б.

Тем не менее, самым сильным аргументом в пользу существования универсального соотношения цвет–цвет–величина в УФ и оптических цветах является возможность вычисления фотометрических красных смещений, используя только три наблюдаемых цвета,

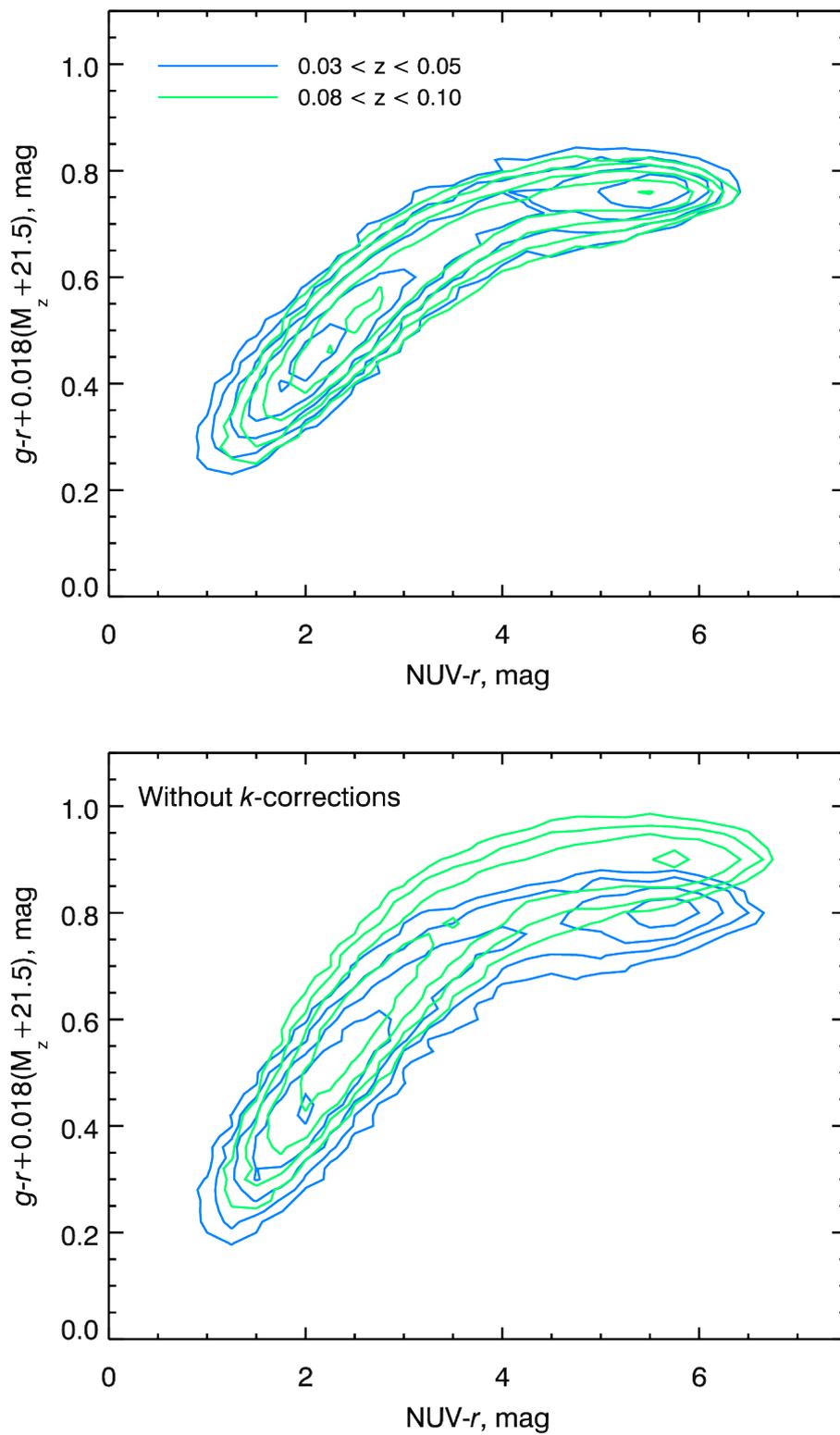


Рис. 3.6: Тесты с двумя подвыборками галактик в узких диапазонах красного смещения. Верхняя панель показывает карты плотности для галактик в двух узких диапазонах красного смещения в проекции, показанных зеленым и синим цветами, соответствующих взгляду с ребра на соотношение цвет-цвет-величина. Нижняя панель такая же, как и верхняя, но без учета k -поправок.

как показано в разделе Обсуждений.

3.1.6 Аппроксимация поверхностью сильно неоднородных трехмерных массивов данных с большим разбросом

Процедура аппроксимации данных поверхностью является существенным математическим компонентом, необходимым для получения результатов, представленных в этом разделе. Наблюдательные фотометрические наборы данных для галактик из широкопольных обзоров имеют сильно неоднородное распределение в пространстве цвет–цвет–величина за счет сложного распределения галактик, связанных с их физикой, и различных эффектов селекции и особенностей наблюдений.

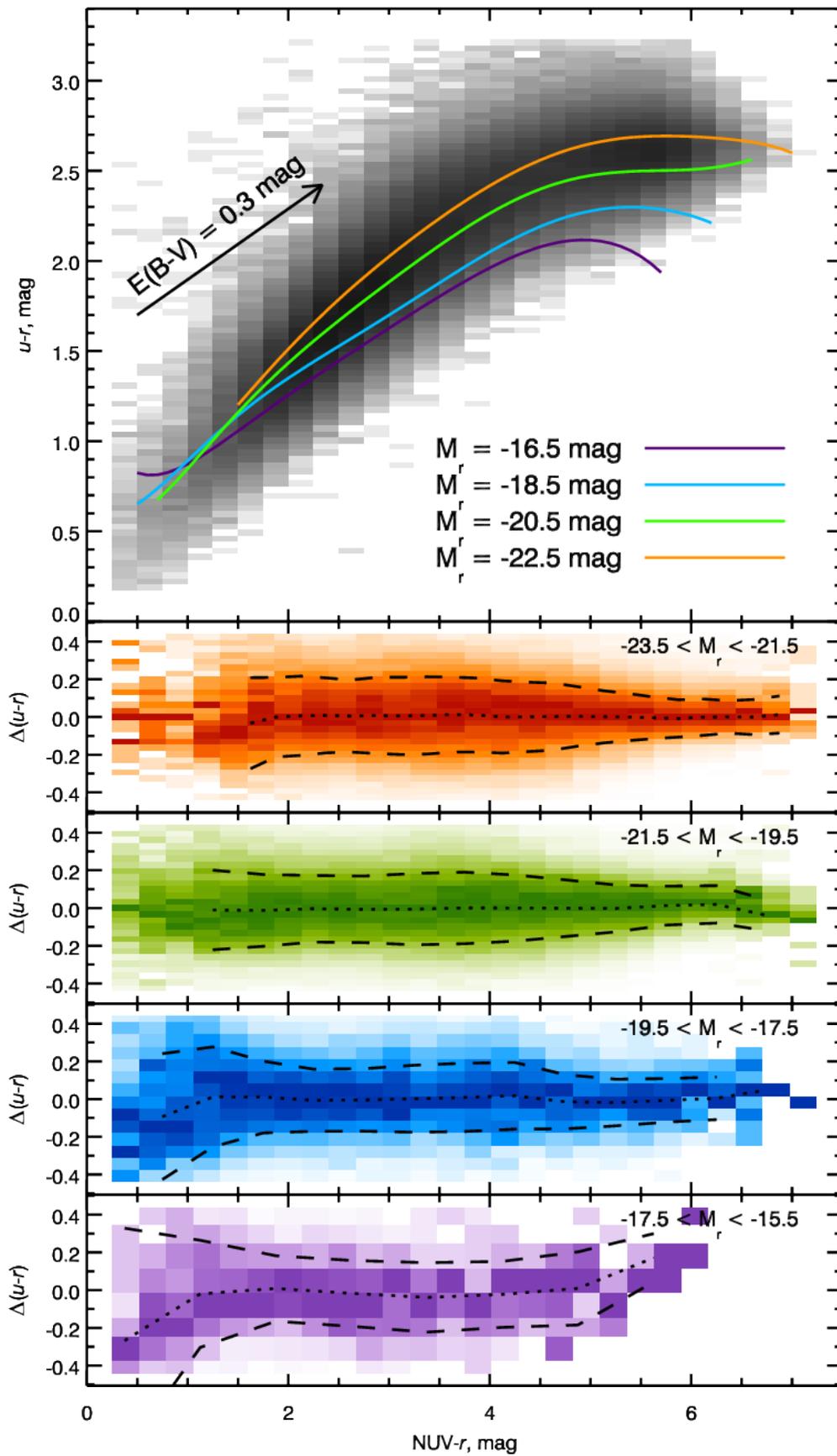
При визуальном осмотре мы обнаружили близкое к гладкой поверхности распределение точек в пространстве цвет–цвет–величина, но примененный стандартный χ^2 -метод линейной аппроксимации поверхностью не дал результатов приемлемого качества, потому что: а) плотность точек в плоскости NUV-цвет–величина изменяется на несколько порядков, в то время как отдельные измерения имеют сопоставимое качество; б) распределение точек вокруг поверхности иногда сильно асимметрично и не является гауссовым. Первое свойство распределения приводит к тому, что малонаселенные области могут существенно отстоять от поверхности без заметного изменения в качестве аппроксимации. Последнее свойство приводит к неправильным результатам аппроксимации, как метода минимизации χ^2 , предполагающего гауссово распределение ошибок. Метод отсечения по $k\sigma$ не решит проблему, потому что здесь мы имеем дело с большим количеством точек, отклоняющихся от симметричного распределения, а не с отдельными отскоками.

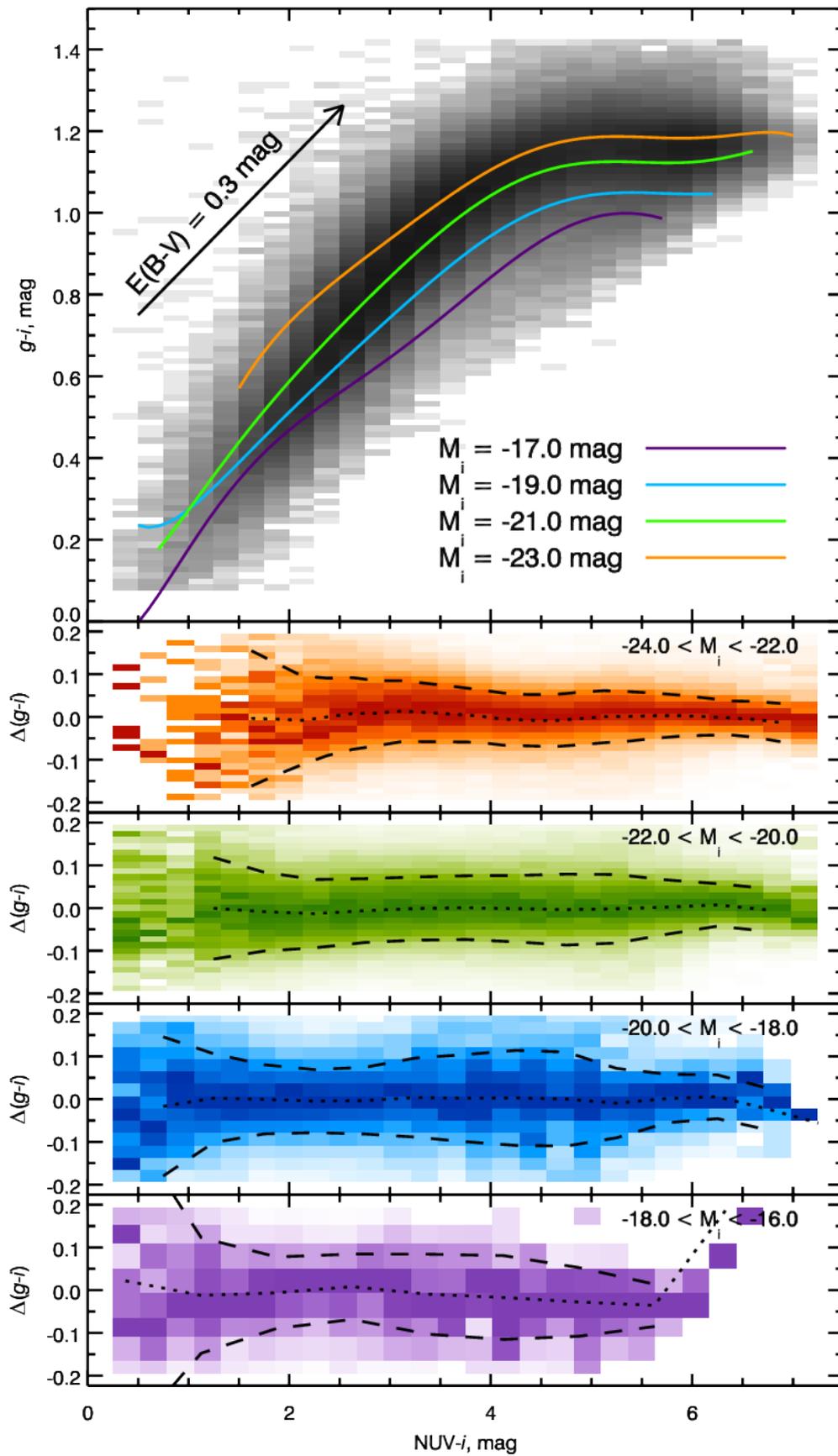
Для решения этих вопросов в простой форме, мы решили использовать двухшаговый метод для аппроксимации поверхности. Во-первых, мы определили размер ячейки (размер ячейки приблизительно 0.25×0.25 зв. вел.) сетки в плоскости NUV-цвет–величина и в каждом окне вычисляли средние значения аппроксимируемого оптического цвета. Это позволило нам найти максимумы распределений цветов (например, $g - r$) в каждом окне, а не средние значения, что имело решающее значение для того, чтобы учесть асимметричность распределения точек вокруг поверхности. Затем мы отфильтровали значения, где отсчеты на 2D-гистограмме в данном окне были ниже некоторого порогового значения (обычно, 5 или 7 галактик). На втором этапе мы аппроксимировали поверхность полиномом низкого порядка по этим медианным значениям с использованием стандартной процедуры аппроксимации полиномиальной моделью с равными весами для всех точек, оставшихся после фильтрации на первом этапе. Таким образом, мы учли сильно неоднородное распределение галактик в плоскости NUV-цвет–величина.

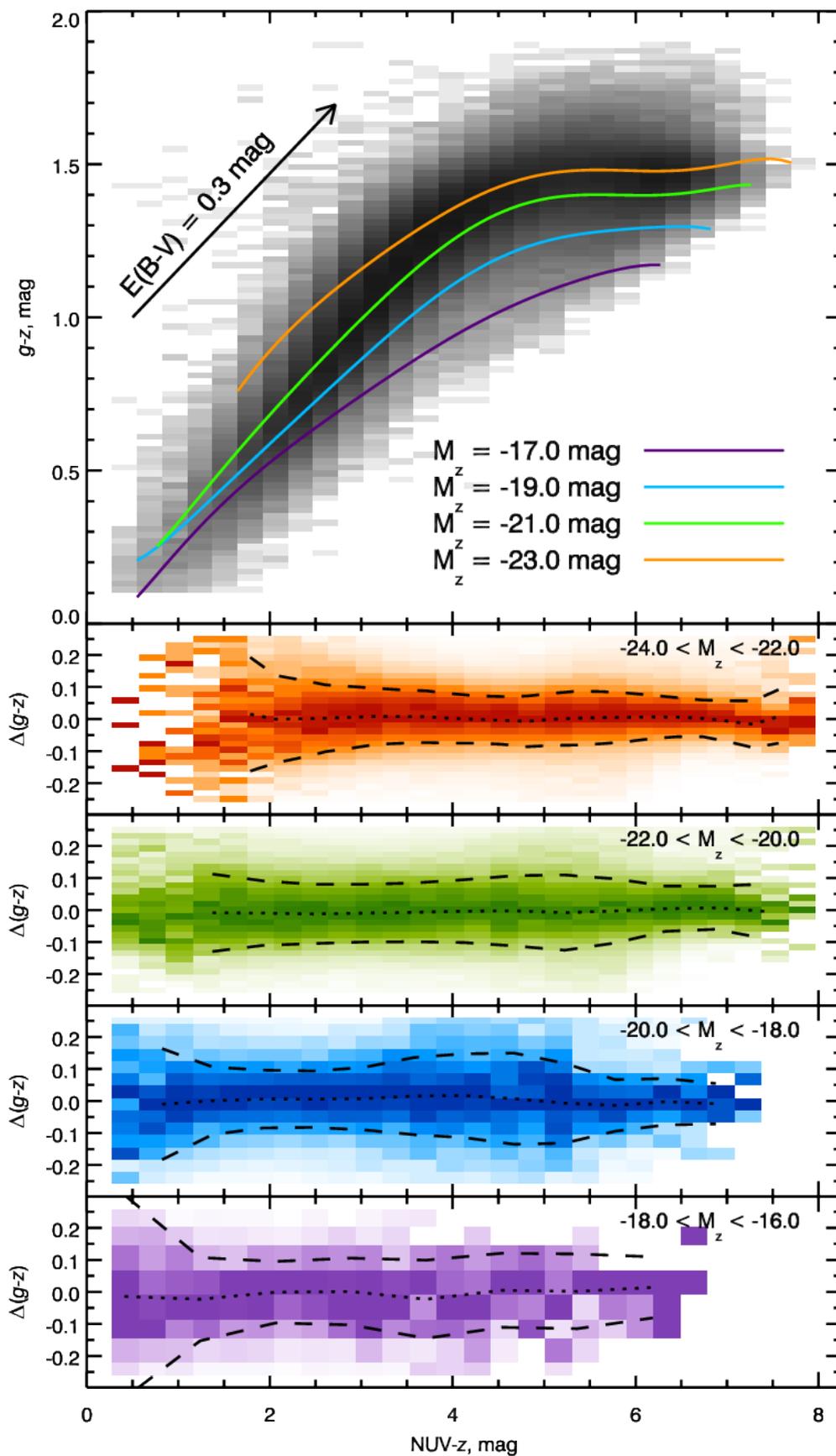
Этот двухшаговый подход привел к почти равномерному распределению невязок, показанных на Рис. 3.1 и обсуждаемых в следующем разделе.

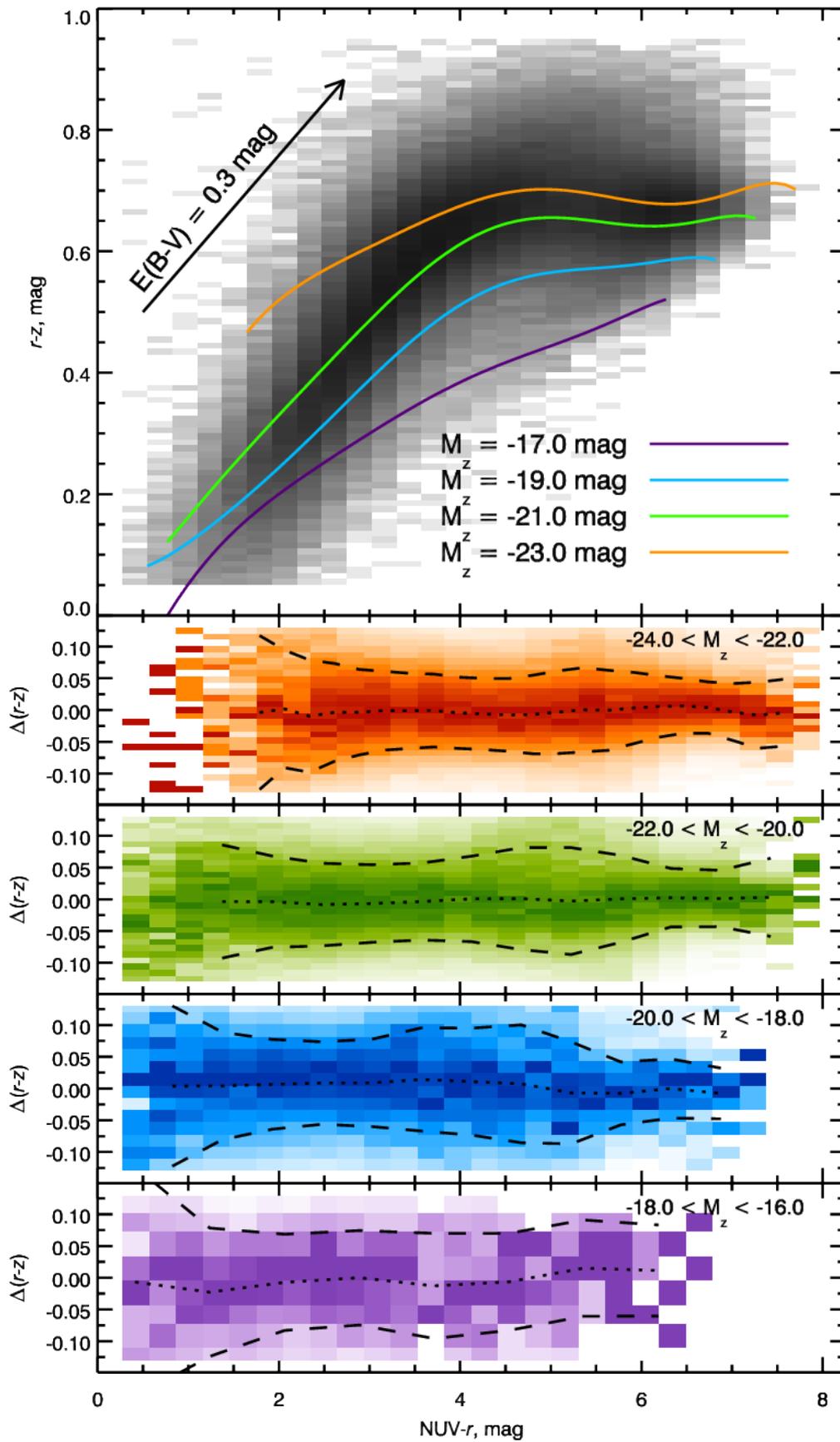
3.1.7 Соотношения цвет–цвет–величина при различных комбинациях цветов

На Рис. 3.7–3.10 показаны проекции цвет–цвет соотношения цвет–цвет–величина в различных цветах из ближнего УФ и оптического диапазона, описанные в Разделе 3.1.3.2. Все результаты моделирования, включая коэффициенты поверхностей наилучшей аппроксимации, невязки аппроксимации в окнах цвет–величина и другая существенная для поль-

Рис. 3.7: То же, что на Рис. 3.1, но для пространства $(NUV - r, u - r, M_r)$.

Рис. 3.8: То же, что на Рис. 3.1, но для пространства $(NUV - i, g - i, M_i)$.

Рис. 3.9: То же, что на Рис. 3.1, но для пространства $(NUV - g, g - z, M_z)$.

Рис. 3.10: То же, что на Рис. 3.1, но для пространства $(NUV - z, r - z, M_z)$.

зования информация о соотношении представлена в электронной форме ³.

3.2 Изолированные компактные эллиптические галактики: сбывшие звездные системы

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работе *Chilingarian & Zolotukhin (2015)*.

В предыдущем Разделе 3.1 показывается, что все известные сЕ галактики плохо согласуются с универсальным соотношением цвет–цвет–звездная величина (по оптическим и УФ данным) для нормальных галактик. Опираясь на это свойство, мы смогли предпринять поиск сЕ галактик не только в центрах богатых скоплений и групп, как делалось ранее (*Chilingarian et al., 2009a*), но и в произвольном окружении, используя оптический обзор SDSS (*Abazajian et al., 2009*) и УФ обзор всего неба спутника *GALaxy Evolution eXplorer (GALEX, Martin et al. (2005))*, данные которых открыты и доступны в Виртуальной Обсерватории.

Вначале мы составили предварительный список кандидатов из объектов со спектрами SDSS (а значит с оценками расстояний), выделяя среди них те, для которых цвет ($g - r$) на $+0.035$ зв. вел. выше универсального соотношения (*Chilingarian & Zolotukhin, 2012*). Мы выбирали галактики низкой светимости ($L < 4 \times 10^9 L_{\odot}$ или $M_g > -18.7$ зв. вел.), которые имеют маленькие эффективные радиусы ($R_e < 0.6$ кпк) или пространственно не разрешаются на SDSS изображениях, не показывают значительную эллиптичность (которая была бы существенной для далеких спиральных галактик, видимых с ребра), имеют красные смещения в диапазоне $0.007 < z < 0.08$ (что соответствует расстояниям между 30–340 Мпк) и, либо обладают красными цветами в ближнем УФ ($(NUV - r) > 4$ зв. вел.), либо не детектируются в *NUV* полосе. Мы ставили ограничения по цвету, а также отфильтровывали объекты с эмиссионными линиями в спектрах, для того чтобы исключить галактики с недавним или идущим сейчас звездообразованием.

Следующим шагом была аппроксимация SDSS спектров отобранных галактик с использованием сетки моделей звездных населений кодом *NBURSTS (Chilingarian et al., 2007a)* для того, чтобы получить средние возраста, металличности и дисперсии скоростей звезд. Мы исключили кандидатов со звездными возрастaми менее 4 млрд. лет и ввели дополнительное ограничение по звездной дисперсии скоростей ($\sigma > 60$ км с⁻¹). Для звездных систем, чье равновесие поддерживается случайными движениями звезд — как в случае большинства эллиптических галактик — их динамическая масса M_{vir} , эффективный радиус R_e и глобальная дисперсия скоростей σ_v связаны простым вириальным соотношением $M_{\text{vir}} = 9.96 R_e \sigma_v^2 / G$ (*Spitzer, 1969; Hernquist, 1990*). Таким образом, для галактики с известной дисперсией скоростей и звездной массой M_* , полученной из ее светимости и параметров звездного населения, мы можем оценить нижний предел для эффективного радиуса (если в галактике есть темная материя, ее реальный эффективный радиус будет больше, так как $M_{\text{vir}} > M_*$). Отсюда, выбирая галактики только с высокими дисперсиями скоростей, мы можем надежно исключить протяженные объекты, такие как “нормальные” карликовые эллиптические галактики, не разрешающиеся на SDSS изображениях из-за больших расстояний до них.

³<http://rcsed.sai.msu.ru/galaxy-colors/>

В итоге мы составили выборку из 195 галактик (Рис. 3.11). Далее, сопоставляя этот список с каталогом групп галактик SDSS Tempel et al. (2012), мы нашли, к каким группам или скоплениям они принадлежат. Для 7 объектов, отсутствующих в этом каталоге, мы установили их вероятные родительские галактики (это, в основном, центральные галактики групп), расположенные от 750 кпк до 3.3 Мпк в картинной плоскости от рассматриваемой галактики. По той причине, что некоторые яркие и протяженные галактики отсутствовали в спектральной выборке SDSS (поэтому и в каталоге групп SDSS), мы также использовали базу данных NED (NASA/IPAC Extragalactic Database) для исследования еще 45 сЕ галактик. Наша финальная выборка содержит 56 галактик в скоплениях, 128 в группах и 11 изолированных (или галактик поля) сЕ. Восемь галактик (см. ниже) демонстрируют отчетливые признаки приливных взаимодействий, аналогичные тем, что обнаруживались в сЕ галактиках известных ранее (Huxor et al., 2011).

Возраста, металличности (см. Рис. 3.12), цвета и светимости 11 изолированных сЕ галактик не показывают статистически значимой разницы с галактиками-членами скоплений и групп. Согласно критерию Колмогорова–Смирнова (КС) подвыборки изолированных и неизолированных сЕ галактик принадлежат одной и той же популяции объектов с вероятностью от 30% (анализируя распределение по светимостям) до 80% (рассматривая распределение по металличностям). Наша выборка сЕ галактик не показывает никакой корреляции между металличностью и звездной массой, в отличие от нормальных эллиптических галактик, демонстрирующих более тесную корреляцию масса–металличность (Рис. 3.12).

Для богатых групп и скоплений, в которых есть сЕ галактики, мы построили каустические диаграммы (Kaiser, 1987; Diaferio & Geller, 1997; Diaferio, 1999), показывающие отличие радиальных скоростей членов скопления от его центра в зависимости от расстояния до него в проекции. Такая диаграмма отражает динамический статус рассматриваемой галактики: находится ли она глубоко внутри гравитационного потенциала скопления или, возможно, впервые приближается к нему, в случае ее приграничного расположения на каустической диаграмме.

Мы сконструировали синтетическое *усредненное* скопление, нормируя реальные данные разных скоплений и групп на их дисперсии скоростей и размеры для 33 структур из нашей выборки, каждая из которых имела более 20 галактик-членов (Carlberg et al., 1997; Biviano & Girardi, 2003). Затем мы построили каустическую диаграмму этого синтетического скопления для того, чтобы визуализировать фазовое пространство для галактик, падающих на скопление, и нанесли на нее наши сЕ галактики (Рис. 3.13). Мы видим, что популяция сЕ галактик сильно отличается от других членов скопления. КС тесты для распределений расстояния в проекции и радиальной скорости отвергают на 97–98% уровне гипотезы, что сЕ и другие члены скопления принадлежат одной популяции галактик. Численное моделирование приливного обдирания (Chilingarian et al., 2009a; Pfeffer & Baumgardt, 2013) показывает, что галактика-прародитель сЕ, даже если она приближается к центру скопления по очень вытянутой радиальной орбите, из-за динамического трения потеряет значительную долю своей орбитальной энергии и перейдет на тесную орбиту во внутренней области скопления — чтобы в конце концов разрушиться и аккрецировать на центральную галактику скопления через несколько млрд. лет. Многие сЕ галактики из нашей выборки демонстрируют такое поведение (см. Рис. 3.13). Однако также некоторые сЕ наблюдаются вблизи границ каустик, что указывает на то, что они едва связаны со

скоплением, поскольку они не принадлежат к популяции падающих на него галактик, как было показано выше. Это выглядит нереалистично в случае сближения двух галактик, которое приводит в результате к приливному взаимодействию между ними, однако, при взаимодействии трех и более галактик выброс самой легкой из них выглядит вполне вероятным.

Взаимодействие двойных звезд с центральными сверхмассивными черными дырами — это один из предполагаемых сценариев происхождения сверхскоростных звезд в нашей Галактике (Brown et al., 2005): одна звезда из двойной системы выбрасывается со значительной скоростью, тогда как другая падает на черную дыру. Решая задачу трех тел, также можно получить экстремально высокие орбиты галактик-спутников Млечного Пути, найденных на расстояниях вплоть до 3 Мпк от него (Sales et al., 2007). Даже несмотря на то, что типичные скопления галактик имеют более широкие и глубокие потенциальные ямы, чем у Локальной Группы, столкновения трех и более галактик могут происходить чаще в более плотных окружениях. Поэтому существует определенная вероятность, что в некоторых случаях галактики могут выбрасываться из потенциальной ямы на экстремальные орбиты с апоцентрическими расстояниями порядка мегапарсека (Wetzel et al., 2014). Взаимодействие трех тел, которое может выкинуть сЕ галактику из родительского скопления, не обязательно должно происходить в течение приливного обдиранья третьей галактики, то есть две галактики не обязательно должны падать на центр скопления/группы одновременно. Когда галактика-прародитель сЕ уже ободрана приливными силами, она выходит на тесную затухающую орбиту вокруг массивной галактики (Chilingarian et al., 2009a). Именно тогда взаимодействие трех тел становится возможным — если на центр скопления в этот момент начнет падать еще одна галактика. В этом случае свежесформировавшийся сЕ карлик может быть выброшен.

Мы можем оценить вероятность близкого взаимодействия трех тел геометрически. Численные модели показывают (De Lucia & Blaizot, 2007), что в течение двух млрд. лет — типичного времени жизни сЕ галактики (Chilingarian et al., 2009a) — среднестатистическая ярчайшая галактика скопления (brightest cluster galaxy, BCG) должна испытать 3–4 слияния с массивными ($M \gtrsim 10^{10} M_{\odot}$) галактиками. Мы предполагаем, что а) типичные сЕ галактики находятся на квазикруговых орбитах в пределах $r_{cE} \sim 120$ кпк от BCG-галактики после исправления за эффекты проекции (Рис. 3.17); б) галактики могут падать на BCG по радиальным орбитам с любого направления; в) столкновение трех тел будет довольно вероятно, если сЕ галактика пройдет ближе $r_{zb} \approx 20$ кпк от массивной падающей галактики. Отсюда вероятность — это отношение объемов цилиндра радиуса r_{zb} и высоты r_{cE} и шара радиуса r_{cE} , $P_{zb} = 3/4(r_{zb}/r_{cE})^2 \approx 0.02$, или около 6–8% для 3–4 событий слияний.

В нашей выборке сЕ галактик скоплений и групп мы в самом деле видим многочисленные примеры, где сЕ находятся по проекционным расстояниям всего лишь от 20 до 80 кпк от массивных галактик скопления, находящихся на стадии слияния, т.е. в непосредственной окрестности сЕ и центральной галактики группы/скопления наблюдается другая массивная галактика. Помимо этого в пользу такого сценария говорит и известный пример шарового звездного скопления в скоплении галактик Девы (Caldwell et al., 2014), которое, по-видимому, было выброшено на большой скорости 2500 км с^{-1} и перестало быть гравитационно связанным со скоплением галактик Девы и его центральной галактикой M87.

С учетом представленных выше аргументов мы делаем вывод, что процесс приливного обдирания может объяснить все наблюдаемые проявления компактных эллиптических галактик, включая изолированные сЕ, чье существование недавно представлялось серьезным аргументом против этого механизма (Huxor et al., 2013). Выбрасывание сЕ галактик из центральных областей скоплений происходит из-за эффектов взаимодействия трех тел — это дает возможность подобным галактикам выживать значительно дольше, в сравнении с сЕ в агрессивной среде скоплений, где они упадут на массивную галактику в течении 2–3 млрд. лет. Обнаруженные 11 изолированных сЕ карликов, по-видимому, представляют собой популяцию галактик, навсегда выброшенных из скоплений или групп, в которых они образовались.

Механизм гравитационного выбрасывания может также объяснить существование редких изолированных пассивных (quiescent) карликовых галактик (Geha et al., 2012), прерванное звездообразование которых чаще всего объясняется эффектами окружения. Подобные системы имеют большие, чем сЕ галактики, размеры и не демонстрируют признаков значительного приливного обдирания. Последнее свойство говорит о том, что они никогда не находились в ближайшей окрестности центров скоплений или групп и, поэтому события взаимодействия трех тел должны быть для них более редкими, чем для сЕ, хотя и не невозможными.

Дополнительный материал: каталог галактик

Отправной точкой для поиска кандидатов в сЕ галактики было составление каталога, содержащего одновременно все необходимые наблюдательные характеристики объектов. В качестве основной выборки мы взяли каталог RCSED, подробно описанный в Разделе 1.1 методической Главы 1. Из него мы выбрали нормальные галактики без активного звездообразования в диапазоне красных смещений $0.007 < z < 0.6$. Тем самым мы получили каталог из 429 707 объектов со спектрами и распределениями спектральной энергии в широком диапазоне от УФ до оптики в 11 фотометрических фильтрах (*FUV* и *NUV* из *GALEX*, *ugriz* из *SDSS* и *YJHK* из *UKIDSS*). Петросьяновские звездные величины в каталоге RCSED исправлены за *k*-поправки с использованием аналитического приближения Chilingarian et al. (2010). Спектры SDSS в каталоге RCSED аппроксимировались современными моделями звездных населений. Эта процедура дала на выходе возраста и металличности звезд наравне со звездными дисперсиями скоростей, которые мы использовали для поиска сЕ галактик.

Аппроксимация абсорбционных спектров галактик

Для того, чтобы получить кинематику и свойства звездного населения, мы использовали технику аппроксимации абсорбционных спектров галактик NBURSTS (Chilingarian et al., 2007a) моделями простых звездных населений (simple stellar population, SSP) высокого разрешения ($R = 10000$) PEGASE. HR (Le Borgne et al., 2004), вычисленными с салпитевской начальной функцией масс звезд (см. Рис. 3.14). Подробно детали этой процедуры описаны в Разделе 1.1.1.3 методической Главы 1, здесь мы приведем лишь краткий обзор метода, актуальный в контексте поиска сЕ галактик.

Процедура аппроксимации включает в себя следующие шаги: 1) Сетка SSP спектров с фиксированными возрастами (в диапазоне от 20 млн. лет до 18 млрд. лет.) и металлич-

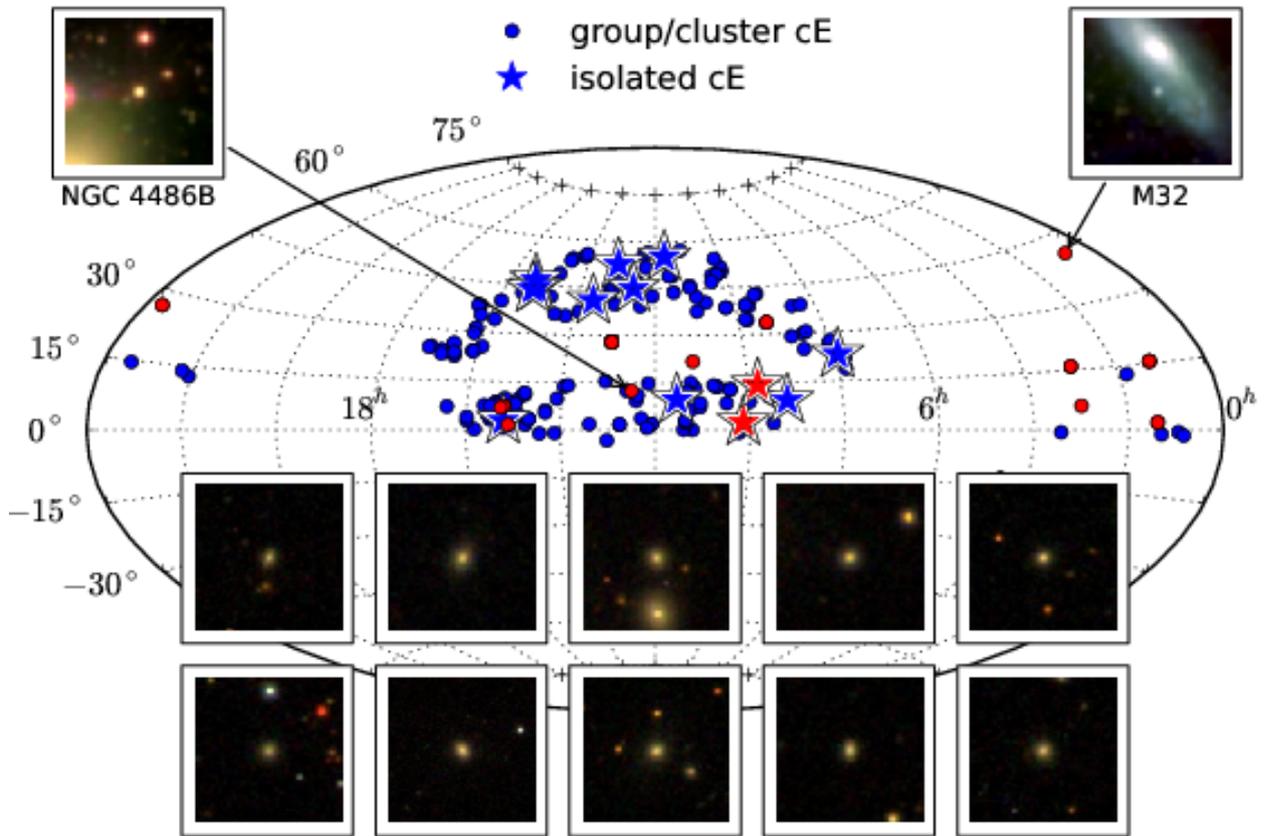


Рис. 3.11: Выборка компактных эллиптических галактик во всех типах окружений. Наша выборка компактных эллиптических галактик (голубые символы) сравнивается с данными из литературы (красные символы). Кружки и звезды обозначают сЕ галактики из групп/скоплений и изолированные сЕ галактики, соответственно. На квадратных панелях в нижней части рисунка приведены изображения некоторых объектов из нашей выборки, тогда как сверху в углах представлены изображения M32 и NGC 4486, которые являются прототипами сЕ галактик в локальной Вселенной, как они бы выглядели на телескопе SDSS на расстоянии 130 Мпк. Каждое изображение показывает область 20×20 кпк, центрированную на сЕ галактику.

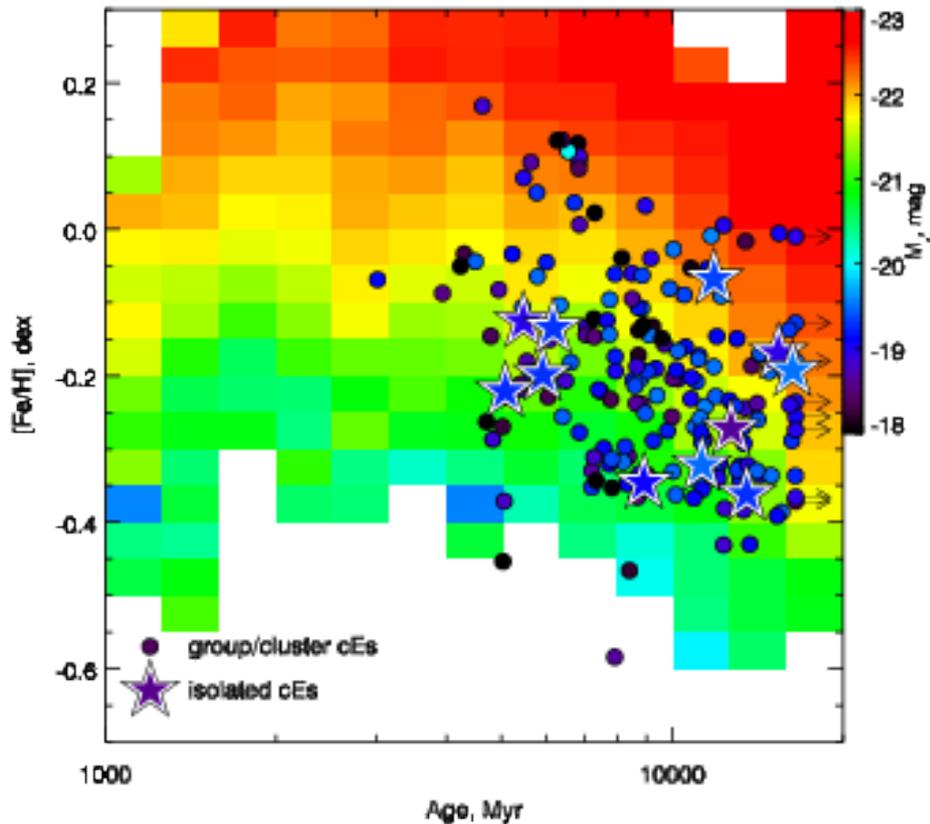


Рис. 3.12: Сравнение свойств звездных населений изолированных и неизолированных компактных эллиптических галактик с опорной выборкой эллиптических галактик SDSS. Звездные возраста и металличности для сЕ галактик из групп и скопления (круглые символы) и для изолированных сЕ (звездочки) определялись с помощью техники аппроксимации абсорбционных спектров галактик NBURSTS по данным SDSS. Цвета символов соответствуют абсолютным звездным величинам в фильтре r , определенным из фотометрических данных SDSS. Мы вычислили тем же методом возраста и металличности для опорной выборки 82 500 эллиптических галактик из SDSS DR7. Фоновой картой цвета с такой же цветовой шкалой, как для сЕ галактик, показана медианная абсолютная звездная величина в фильтре r в каждом окне пространства параметров возраст–металличность для эллиптических галактик из опорной выборки. Данная диаграмма иллюстрирует следующие факты: а) звездные населении изолированных и сЕ галактик в группах/скоплениях статистически не различаются; б) сЕ в среднем имеют существенно меньшую светимость, чем нормальные эллиптические галактики тех же возрастов и металличностей.

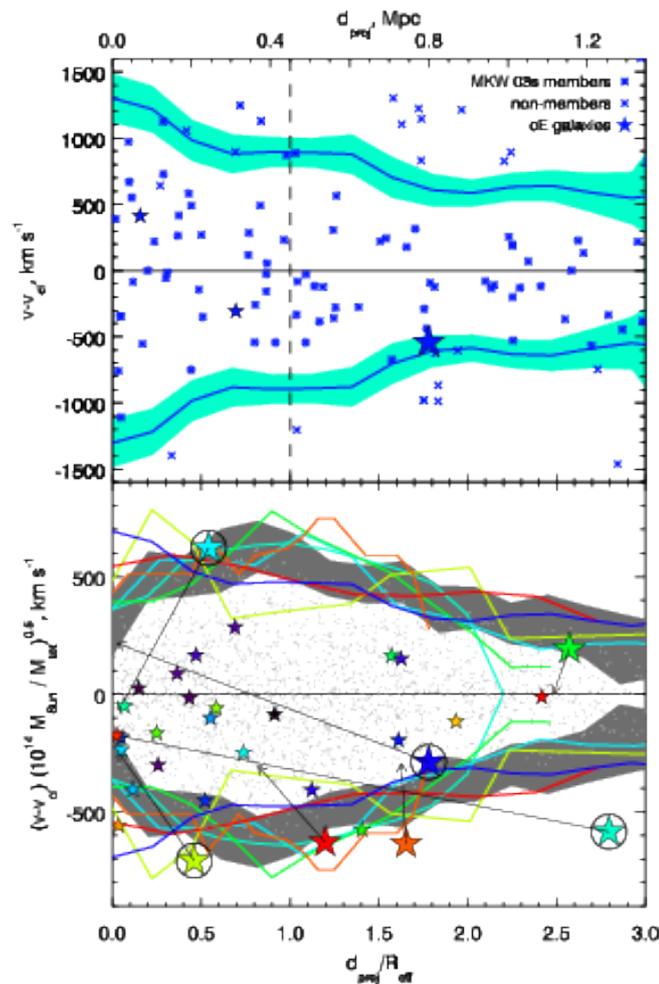


Рис. 3.13: Положения сЕ галактик на каустических диаграммах в скоплениях и богатых (более 20 членов) группах галактик по данным SDSS. Верхняя панель: пример каустической диаграммы, показывающей расстояния в проекции и разницу радиальных скоростей членов скопления по сравнению с центром скопления MKW 03s, которое включает в себя три сЕ галактики (показаны звездочками). Полученные нами каустики показаны синими сплошными линиями, они примерно соответствуют скорости убегания галактики на данном расстоянии от центра скопления. Цветной полосой вокруг показана их статистическая неопределенность 1σ . Нижняя панель: каустики для синтетического *усредненного* скопления (см. текст) из 2592 галактик-членов, отмеченных светло-серыми точками, показаны как темно-серые полосы. Для 6 отдельных скоплений цветными сплошными кривыми показаны каустические линии, нормированные на соответствующие дисперсии скоростей и эффективные радиусы (R_{eff}). Маленькими звездочками изображены сЕ галактики, локализованные глубоко внутри потенциальных ям этих 6 скоплений галактик, а большие звездочки (с цветами, совпадающими с цветами каустик) — имеющие радиальные скорости по крайней мере в 85% от амплитуды каустики. Стрелка указывает на положение отождествленной хозяйской галактики для соответствующей сЕ. В трех случаях они отличаются от центральных галактик скоплений, что говорит, что данные сЕ галактики принадлежат подгруппам внутри скопления, и каустическая диагностика для них не корректна. Однако четыре сЕ, обведенные в кружки, являются примерами галактик, слабо связанных со своими скоплениями, в которых они образовались.

ностями (от -2.0 до $+0.5$ dex) сворачивается вдоль спектра с зависящим от длины волны инструментальным откликом спектрографа SDSS, который содержится в 6-ом расширении каждого FITS файла со спектром SDSS. 2) Аппроксимация наблюдаемого спектра нелинейным методом наименьших квадратов делается синтетической моделью из предварительно свернутой сетки SSP, интерполируя ее по возрасту ($\log t$) и металличности (Z), при этом уширяя с учетом распределению скорости на луче зрения (LOSVD), параметризованной по v и σ , и домножая на полином Лежандра порядка n^{th} (мультипликативный континуум). Эта аппроксимация, таким образом, дает $n+5$ параметров наилучшей модели (мы использовали $n = 19$ для спектров SDSS).

Процедура аппроксимации, оценка ошибок анализа и вырождение между кинематикой и параметрами звездных населений подробно описаны в Разделе 1.1.1.3 и оригинальных работах Chilingarian et al. (2007a,b). Анализ систематических ошибок в параметрах звездных населений по отношению к обогащению α -элементами приводился в Chilingarian et al. (2008), к чувствительности различных спектральных особенностей — в Chilingarian (2009). Выбор начальной функции масс звезд в моделях не влияет на оценки звездной металличности и только незначительно меняет звездные возраста (Podorvanyuk et al., 2013).

Для того, чтобы точно оценить дисперсию скоростей, мы сворачиваем SSP сетку с функцией уширения спектральной линии (line spread function, LSF) спектрографа, меняющейся вдоль спектра по длине волны. В спектрах SDSS DR9 форма LSF доступна в каждом FITS файле с данными. Ранее было показано (Chilingarian et al., 2011), что для спектров со средним отношением сигнал/шум дисперсия скоростей звезд может быть оценена с точностью 10% вплоть до $\sim 1/2$ ширины LSF (выраженная как σ в распределении Гаусса). Для SDSS это соответствует ~ 45 км с $^{-1}$, что существенно ниже нашего критерия по дисперсии скоростей ($\sigma > 60$ км с $^{-1}$, см. ниже).

3.2.1 Отбор кандидатов в сЕ

Помещая известные сЕ галактики на 3D диаграмму цвет–цвет–звездная величина в оптическом и УФ диапазоне, мы заметили, что они находятся в ограниченной области в этом пространстве параметров (см. подробнее Раздел 3.1 и Chilingarian & Zolotukhin, 2012). Для определения этой области мы использовали несколько приближений для формализации запроса к базе данных. Результатом было 6 выборок сЕ-кандидатов, взятых из описанной выше подвыборки каталога RCSED (см. Раздел 1.1). Так как входные данные были получены с помощью нескольких *неидеальных* пакетов обработки данных, мы просмотрели вручную изображение каждого кандидата для того, чтобы исключить протяженные галактики с яркими ядрами, дисковые галактики, видимые с ребра, и возможные артефакты, которые также по каким-либо причинам удовлетворяли нашим автоматическим критериям поиска сЕ галактик.

Мы выбрали объекты, которые имеют а) красные оптические ($g - r$) цвета как минимум на $+0.035$ зв. вел. выше универсального соотношения цвет–цвет–звездная величина (Chilingarian & Zolotukhin, 2012); б) низкие светимости ($L < 4 \times 10^9 L_{\odot}$ или $M_g > -18.7$ зв. вел; в) небольшой эффективный радиус ($R_e < 0.6$ кпк) или пространственно не разрешаются на SDSS изображениях; г) незначительную эллиптичность; д) красные смещения в диапазоне $0.007 < z < 0.08$ (то есть расстояния между 30 и 340 Мпк); е) либо красные цвета в ближнем УФ ($(NUV - r) > 4$ зв. вел.), либо не видны в NUV диапазоне; ж) без значительных эмиссионных линий в спектрах; з) дисперсии скоростей

$\sigma > 60 \text{ км с}^{-1}$ и возраста звездных населений $t > 4$ млрд. лет.

В следующих разделах мы приведем список критериев, которые использовались для построения выборок.

Начальная выборка

Начальная выборка включает 108 галактик, которые имеют $NUV - r > 4.0$ зв. вел. и абсолютную звездную величину в фильтре g слабее -18.7 зв. вел., 50% петросьяновского радиуса меньше $2''$ в угловой мере или ниже 0.7 кпк в физической масштабе, расстояние от 3D поверхности (Chilingarian & Zolotukhin, 2012) вдоль оси $g - r$ цвета более 0.035 зв. вел., возраст звездного населения более 4 млрд. лет и дисперсию скоростей выше 60 км с^{-1} — последние два параметра определяются из SSP аппроксимации.

Ниже мы приводим формальную форму запроса в программе TOPCAT (Taylor, 2005) с названиями колонок из каталога RCSED (см. Раздел 1.1). Заметим, что столбец GR_FIT — это значение цвета $g - r$ на 3D поверхности в координатах $(g - r, NUV - r, M_g)$.

```
(corrmag_NUV - corrmag_r - kcorr_NUV + kcorr_r) > 4.0 &&
(corrmag_g - kcorr_g - 25 - 5 * log10(luminosityDistance(z, 72.0, 0.3,
0.7))) > -18.7 &&
(petror50_r < 2.0 || petror50_r / 206.265 * luminosityDistance(z,
72.0, 0.3, 0.7) < 0.7) &&
(corrmag_g - corrmag_r - kcorr_g + kcorr_r - gr_fit) > 0.03 &&
age_ssp > 4000.0 && dispvel_ssp > 60.0
```

После ручной проверки в выборке осталось 56 сЕ галактик. Следующие два критерия на возраст и дисперсию скоростей (`age_ssp > 4000.0 && dispvel_ssp > 60.0`) были одинаковыми для всех выборок, за исключением той, которая выделялась по вириальному радиусу.

Выборка по УФ

Вторая выборка была создана, чтобы ослабить требование детектирования галактики в диапазоне NUV , так как только 47% галактик из каталога RCSED имеют измеренные звездные величины в фильтре NUV . Мы поэтому отбросили ограничения на цвет $NUV - r$ и на использование нашего универсального трехмерного фотометрического соотношения (так как оно также требует наличие измеренной звездной величины в фильтре NUV). Вместо этого к нашими обычным требованиям — SSP возрасту более 4 млрд. лет и дисперсии скоростей свыше 60 км с^{-1} — мы добавили простое геометрическое ограничение из канонической зависимости цвет-звездная величина $(g - r, M_r)$: галактика-кандидат должна быть краснее, чем красная последовательность с учетом разброса 1σ . Это можно записать в виде: $g - r > 0.8 - (M_r + 20.0) \cdot 0.1/3.0$. Отсюда мы получаем следующий формальный запрос:

```
(corrmag_g - kcorr_g - 25 - 5 * log10(luminosityDistance(z, 72.0, 0.3,
0.7))) > -18.7 &&
(petror50_r < 2.0 || petror50_r / 206.265 * luminosityDistance(z,
72.0, 0.3, 0.7) < 0.7) &&
age_ssp > 4000.0 && (dispvel_ssp > 60.0 || dispvel_exp > 60.0) &&
(corrmag_NUV < -100 || NULL_corrmag_NUV) &&
(corrmag_g - corrmag_r - kcorr_g + kcorr_r > 0.8 -
(corrmag_r - kcorr_r - 25 - 5 * log10(luminosityDistance(z, 72.0, 0.3,
0.7)) + 20.0) * 0.12 / 3.0)
```

Этот запрос выдает 288 объектов. После визуальной проверки мы добавили 32 дополнительных сЕ-кандидата к нашей основной выборке.

Выборка по оцененному эффективному радиусу

Заметим, что хорошо известные сЕ галактики M32, NGC 4486B, NGC 5846сЕ имеют эффективные радиусы меньше, чем 0.4 кпк. Поэтому мы проверили визуально галактики, которые удовлетворяют нашему начальному критерию, но вместо фильтрации входного каталога по дисперсии скоростей, мы потребовали, чтобы галактики имели эффективный радиус меньше 0.5 кпк, по аналогии с известными сЕ галактиками. Для того чтобы это сделать, мы вычислили отношения массы к светимости для галактик из оригинального каталога, используя модели звездного населения PEGASE.HR, предполагающие начальную функцию масс Салпитера (Salpeter, 1955), и затем оценили эффективные радиусы по соотношениям Spitzer (1969), предполагая, что распределение массы такое же, как и светимости. Этот критерий может быть формально выражен в виде запроса:

```
(corrmag_NUV - corrmag_r - kcorr_NUV + kcorr_r) > 4.0 &&
(corrmag_g - kcorr_g - 25 - 5 * log10(luminosityDistance(z, 72.0, 0.3,
0.7))) > -18.7 &&
(petror50_r < 2.0 || petror50_r / 206.265 * luminosityDistance(z,
72.0, 0.3, 0.7) < 0.7) &&
(corrmag_g - corrmag_r - kcorr_g + kcorr_r - gr_fit) > 0.03 &&
age_ssp > 4000.0 && r_eff < 0.5 && z < 0.08
```

Этот запрос возвращает 82 объекта, из которых наша ручная проверка подтвердила лишь два.

Чтобы ослабить требование на наличие *NUV* звездной величины, мы изменили запрос с вириальным радиусом, так же, как в предыдущей выборке. Отсюда, критерий на эффективный радиус можно записать так:

```
(corrmag_g - kcorr_g - 25 - 5 * log10(luminosityDistance(z, 72.0, 0.3,
0.7))) -18.7 &&
(petror50_r < 2.0 || petror50_r / 206.265 * luminosityDistance(z,
72.0, 0.3, 0.7) < 0.7) &&
age_ssp > 4000.0 && (corrmag_NUV < -100 || NULL_corrmag_NUV) &&
(corrmag_g - corrmag_r - kcorr_g + kcorr_r > 0.8 -
(corrmag_r - kcorr_r - 25 - 5 * log10(luminosityDistance(z, 72.0, 0.3,
0.7)) + 20.0) * 0.12 / 3.0) &&
r_eff_virial < 0.5 && z < 0.08
```

Этот запрос возвращает 102 объекта. Пять из них подтверждены визуально как сЕ-кандидаты и включены в предварительную выборку.

Мы пробовали использовать эффективные радиусы, вычисленные по двумерной аппроксимации изображений SDSS программой GIM2D (Simard et al., 2011). Однако в абсолютном большинстве случаев наши галактики оставались пространственно неразрешенными в этих данных, и эффективные радиусы, оцененные из анализа изображений Simard et al. (2011), не соответствовали их физическим радиусам. Этот недостаток может также быть проиллюстрирован тем фактом, что радиусы Simard et al. (2011) коррелируют с красным смещением. По этой причине мы решили не использовать данные Simard et al. (2011) для нашего анализа.

Дополнительные кандидаты

Мы построили диаграмму цвет–звездная величина ($g - r, r$) и просмотрели все объекты с необычно красными цветами, удовлетворяющие кроме этого критериям по возрасту и дисперсии скоростей. Как оказалось, изображения некоторых из них были испорчены артефактами или проектирующимися звездами нашей Галактики, а в ряде случаев имела места недооценка звездной величины в фильтре g на 0.3 зв. вел. и более. Среди этой последней группы мы нашли 120 сЕ кандидатов, которые мы включили в предварительный список объектов.

Исключение объектов с эмиссионными линиями

После объединения четырех списков галактик, отобранных с помощью описанных выше запросов, мы получили одну предварительную таблицу из 215 кандидатов в сЕ галактики. Затем мы провели финальную проверку для исключения из них объектов с эмиссионными линиями в спектрах. Мы вычислили потоки в линиях в остатках спектральной аппроксимации и использовали их неопределенности для того, чтобы оценить отношение сигнал/шум. Затем мы отбросили объекты, у которых [OII] 3730Å, или [OIII] 5007Å, или H α 6565Å, или [NII] 6585Å превышают порог детектирования 4σ (20 галактик).

Таким образом, мы получили 195 объектов нашей финальной выборки сЕ галактик.

Идентификация родительских галактик

Надежная формальная идентификация хозяйских галактик, с которыми связаны сЕ галактики — это непростая и не всегда возможная процедура. Мы применяли ручной и в некоторой степени субъективный алгоритм, который может плохо подходить для объектов с большими проекционными расстояниями до хозяйской галактики.

Для отождествления хозяйских галактик мы проверили SDSS изображения в окрестности 2° от каждого сЕ-кандидата, используя программу CDS ALADIN. При этом в данной области поиска мы выбирали все SDSS объекты с известными спектральными красными смещениями, отличающихся менее, чем на 2000 км с^{-1} по радиальной скорости от предполагаемой сЕ галактики. Среди отобранных объектов наиболее яркие в группе или скоплении были наиболее вероятными хозяйскими галактиками. В тех случаях, когда самая большая галактика группы/скопления не имела красного смещения по SDSS (в основном из-за неполноты спектрального обзора, связанной с конечным размером световода спектрографа и наличием других близких спектральных целей (fiber collision)), мы использовали базу данных NASA NED для поиска измеренного красного смещения в литературе.

В нескольких случаях вместо ярчайшего объекта в группе или скоплении мы выбрали ближайшую яркую галактику, иногда показывающую признаки взаимодействия с сЕ-кандидатом. В нашем предварительном списке сЕ галактик есть 12 изолированных галактик поля, для которых мы не нашли родительскую галактику, одну из которых мы впоследствии исключили из-за наличия эмиссионных линий в спектре. В итоге в нашей финальной выборке осталось 11 изолированных сЕ галактик.

3.2.2 Свойства финальной выборки сЕ галактик

Компактные эллиптические галактики с приливными хвостами

Наша финальная выборка включает 8 компактных эллиптических галактик с заметными следами приливных взаимодействий с их хозяйскими галактиками (см. Рис. 3.15), похожих на две галактики с приливными хвостами, найденные ранее [Huxor et al. \(2011\)](#). Численное моделирование приливных потоков ([Chilingarian et al., 2009a](#)) показывает, что такие особенности могут наблюдаться только во время относительно короткой стадии формирования сЕ — в течение первых 200–400 млн. лет после первого эпизода пролета галактики-прародителя сЕ вблизи хозяйской галактики. Позднее поверхностная яркость таких структур быстро уменьшается (>29 зв. вел. \cdot угл. сек. $^{-2}$), и становится неотличима от фонового излучения группы.

Хозяйские галактики

Наша новая большая выборка сЕ позволяет нам вычислить статистические свойства хозяйских галактик для 184 сЕ галактик. Большинство сЕ галактик нашей выборки принадлежат группам, включающим в себя 5–30 членов из спектральной выборки SDSS. Для 23 сЕ хозяйские галактики являются спиральными галактиками ранних или поздних типов (во всех таких случаях в группе имеется единственная сЕ галактика), тогда как для всех остальных родительскими галактиками являются массивные линзовидные, эллиптические или сливающиеся галактики.

Распределение разницы между светимостями в фильтре r сЕ и их хозяйских галактик будет отражать распределение отношения их звездных масс, так как M/L в полосе r для сЕ и для гигантских галактик раннего типа похожи (если предполагать одинаковую начальную функцию масс звезд). Полученное распределение $M_r(cE) - M_r(host)$ показано на Рис. S3.16. Оно асимметрично с пиком на 3.25 зв. вел., что соответствует отношению звездных масс 20. Гигантские эллиптические галактики содержат примерно 90% темной материи в пределах их вириального радиуса ([Loewenstein & White, 1999](#); [Mamon & Lokas, 2005](#)), тогда как для ближайших сЕ галактик, таких, как *M32*, содержанием темной материи можно пренебречь, что согласуется со сценарием приливного обдирания, при котором галактика также теряет протяженное гало из темной материи. Это дает оценку медианного отношения массы сЕ к массе хозяйской галактики около 200.

Стоит упомянуть, что прототипы сЕ галактик, *M32* и *NGC 4486B* с отношением масс сЕ к хозяйской галактике 100 и 60, соответственно, находятся в хвосте этого распределения, включающем несколько процентов объектов.

На Рис. 3.17 показано распределение проекционных расстояний в картинной плоскости между сЕ и их отождествленными хозяйскими галактиками. Распределение выглядит почти однородным между 20 кпк и 1 Мпк (в $\log d_{proj}$) с отчетливым пиком на 50–100 кпк. Численное моделирование приливного обдирания [Chilingarian et al. \(2009a\)](#) показывает, что если прародитель сЕ проходит слишком близко к хозяйской галактике, затухание орбиты станет причиной ее чрезвычайно быстрого падения на родительскую галактику на временной шкале нескольких сотен млн. лет. С другой стороны, учитывая типичные условия в скоплениях и богатых группах, приливное обдирание становится значительно менее эффективным на расстояниях, превышающих 200 кпк, и это объясняет уменьшение количества сЕ на диаграмме. Хвост распределения со стороны больших значений d_{proj} ,

ce_objid	ra	dec	plate	mjd	fiberid	...
587722953304375642	237.29089	0.21562	342	51691	548	

Таблица 3.1: Пример таблицы со свойствами 195 сЕ и их хозяйских галактик, найденных в данном исследовании. Отсутствие значения в колонке **host_objid** означает, что эта строка соответствует изолированной сЕ галактике без идентифицированной хозяйской галактики. Полная таблица с описаниями колонок доступна в формате Microsoft Excel как отдельный файл на веб-сайте журнала *Science*.

вероятно, содержит в основном сЕ галактики, которые были гравитационно выброшены из центров скоплений или групп из-за эффектов взаимодействия трех тел.

Расчет каустик для родительских скоплений и групп сЕ галактик

191 сЕ галактика из нашей финальной выборки содержится как член скоплений галактик в каталоге [Tempel et al. \(2012\)](#). Семь из них при этом имеют ранг светимости 1 в группе из двух галактик, поэтому они рассматривались как изолированные сЕ (галактики поля). Для того чтобы изучить динамическую связь между сЕ галактиками и их окружением, мы построили диаграммы фазового пространства, показывающие красные смещения членов скоплений относительно их проекционных расстояний до центров групп. Такие диаграммы обычно имеют характерную воронкообразную форму, границы которой называются каустиками. [Diaferio \(1999\)](#) разработали технику для их вычисления в предположении сферической симметрии в рамках сценария иерархического сгущивания галактик при образовании крупномасштабной структуры. Этот подход представляет собой удобный способ оценки скорости убегания из гравитационной потенциальной ямы, созданной скоплением, на каждом значении расстояния от его центра. Мы использовали реализацию техники [Diaferio \(1999\)](#) в виде программы CAUSTIC APP версии 1.2⁴, чтобы построить каустики для наших скоплений и положения сЕ по отношению к этим каустикам.

После этого мы создали синтетическое *усредненное* скопление галактик для сравнения распределений в этом фазовом пространстве обычных членов скопления и наших кандидатов в сЕ галактики. Для этого мы взяли наблюдаемые данные 33 скоплений галактик с более, чем 20 членов каждое, из которых по крайней мере один являлся кандидатом в сЕ из нашей основной выборки. Массы, дисперсии скоростей и эффективные радиусы скоплений были уже известны после предварительного шага, когда были вычислены и проанализированы их индивидуальные каустики. Мы спроецировали каждое скопление на картинную плоскость, совместили их центры и затем нормировали координаты галактик-членов скоплений в проекции на эффективный радиус их хозяйского скопления. Лучевые скорости относительно центра скопления нормировались на дисперсию скоростей скопления. Затем все скопления галактик смещались на произвольно выбранное красное смещение $z_{ens} = 0.05$. Таким образом, положения и радиальные скорости 2592 галактик из 33 скоплений галактик были приведены к одинаковым шкалам, и стали пригодны для анализа синтетического *усредненного* скопления. Мы определили каустики данного скопления, используя те же настройки по умолчанию в программе CAUSTIC APP, что и ранее.

⁴<http://personalpages.to.infn.it/~serra/causticapp.html>

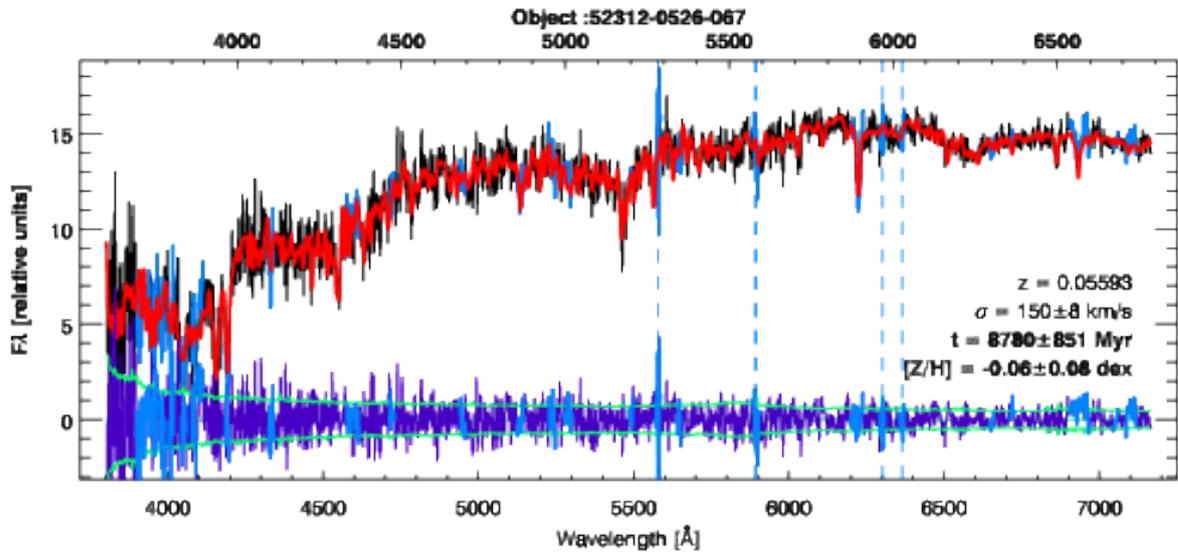


Рис. 3.14: Пример аппроксимации спектра SDSS DR7 компактной эллиптической галактики с использованием метода NBURSTS. Черные, зеленые, красные и фиолетовые кривые показывают наблюдаемый спектр, ошибки ($\pm 1\sigma$), модель наилучшего соответствия и невязки аппроксимации, соответственно. Положение атмосферных линий обозначено пунктирными линиями синего цвета.

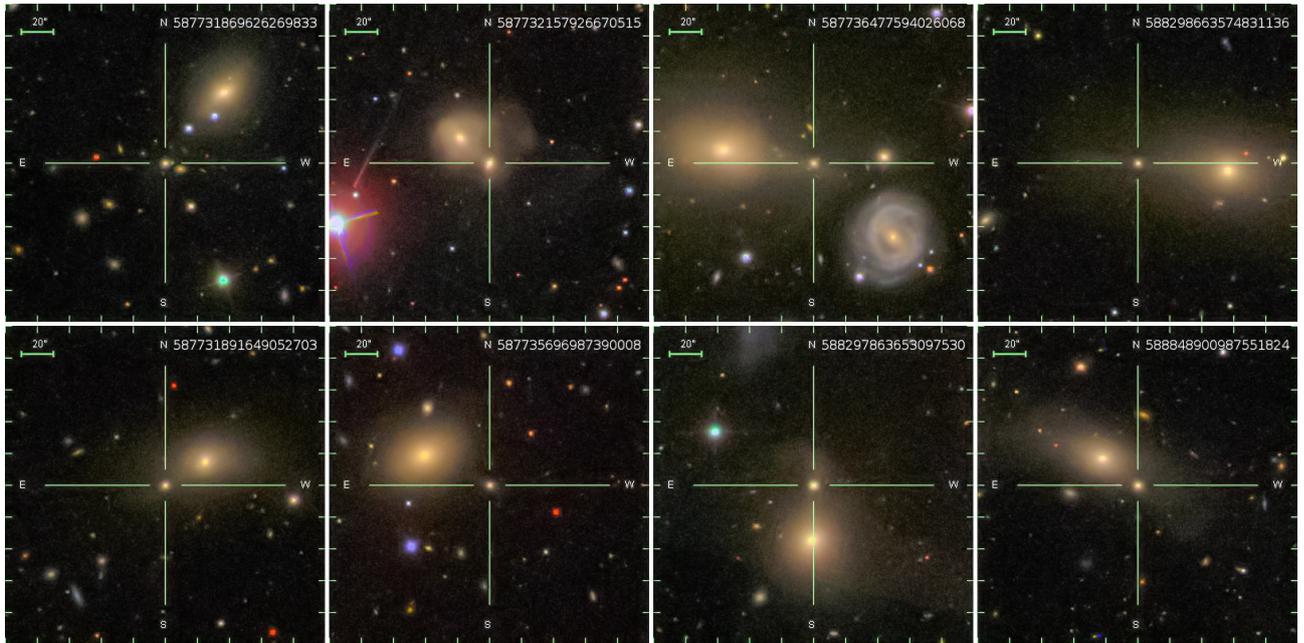


Рис. 3.15: Компактные эллиптические галактики с признаками приливных взаимодействий с хозяйскими галактиками.

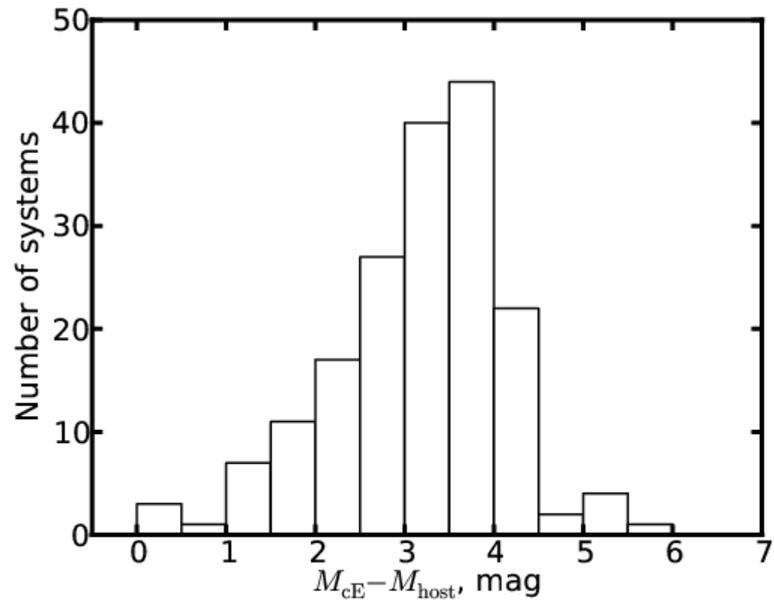


Рис. 3.16: Распределение разницы абсолютных звездных величин в фильтре r для сЕ и их хозяйских галактик $M_{cE} - M_{host}$, отражающее отношение их звездных масс.

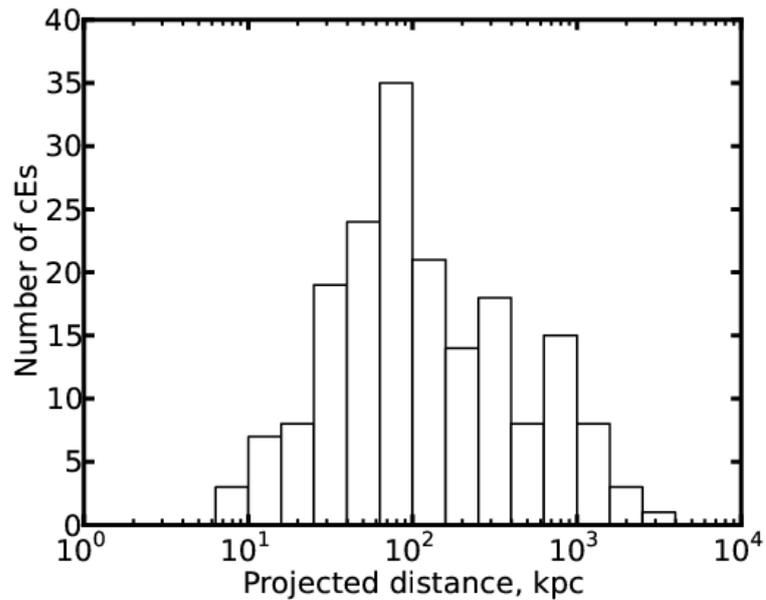


Рис. 3.17: Распределение расстояний в проекции на картинную плоскость между сЕ и их хозяйскими галактиками. Изолированные сЕ галактики на диаграмме не показаны.

Глава 4

Поиск редких астрофизических объектов

Каталог источников *XMM-Newton*, создание которого кратко описывается в Разделе 1.2, открывает большие перспективы для самых разнообразных поисковых исследований — в частности для попыток обнаружить популяцию в тех областях астрофизики, где в настоящее время известны единичные объекты. Важную роль при этом играет не только тот факт, что он является крупнейшим из существующих каталогом рентгеновских источников, но также и то, что он предоставляет богатый набор типов данных по многим из объектов (изображения, спектры, кривые блеска, фотонные ряды).

Отталкиваясь от этих свойств каталога *XMM-Newton* мы предприняли с его помощью поиск популяции гипер-ярких рентгеновских источников, содержащей в настоящее время лишь два объекта ESO 243–49 HLX–1 и M82 X–1, являющиеся наилучшими кандидатами в гипотетические черные дыры промежуточной массы (Раздел 4.1 настоящей главы), и поиск постоянных рентгеновских пульсаров в других галактиках, в списке которых на момент начала работы был известен единственный объект M82 X–2 (Раздел 4.2).

Черные дыры промежуточных масс (IMBH) — это класс черных дыр (BH) с массами больше черных дыр звездных масс (StMBH), но меньше, чем сверхмассивные черные дыры, которые находятся в центрах галактик, с массами в диапазоне $\sim 10^6$ – $10^9 M_\odot$. Черные дыры звездных масс (от ~ 5 до $50 M_\odot$, Fryer & Kalogera (2001)) являются конечной стадией эволюции достаточно массивных звезд, которые сформировались из обогащенного металлами газа, тогда как при низких металличностях могут образовываться намного более массивные звезды и ЧД (см., например, Belczynski et al., 2010, и ссылки в этой работе). На самом деле, предполагается, что звезды с нулевой металличностью могут сформироваться с массами $\sim 10^2$ – $10^3 M_\odot$ и произвести в результате эволюции первичные IMBH (Heger et al., 2003). Процесс образования SMBH (и их последующего роста) из этих первичных ЧД промежуточных масс, согласно иерархическому сценарию формирования, неизбежно даст в результате популяцию IMBH, блуждающих в гало галактики в настоящую эпоху — примерно 100 черных дыр промежуточных масс на гало размером, как у нашей Галактики (см., например, Volonteri & Perna, 2005, и ссылки там). Кандидатами в черные дыры промежуточных масс считаются, например, ультраяркие рентгеновские источники (ULX) — внеядерные рентгеновские источники, аккрецирующие с темпами выше эддингтоновского предела для черных дыр стандартных звездных масс ($\sim 10^{39}$ эрг с⁻¹).

Недавние исследования (Sutton et al., 2013; Bachetti et al., 2013; Walton et al., 2013, см.,

например,) показали, что излучение большинства ультраярких рентгеновских источников со светимостями до $\sim 10^{41}$ эрг с⁻¹ могут быть объяснены сверхэддингтоновской аккрецией на достаточно массивные черные дыры стандартных звездных масс ($\lesssim 100M_{\odot}$). До сих пор был надежно идентифицирован только один кандидат в аккрецирующие черные дыры средних масс — ESO 243–49 HLX–1 (Farrell et al., 2009). Случайно открытый как яркий и переменный рентгеновский источник с максимумом рентгеновской светимости в полосе 0.2–10 кэВ $L_X \simeq 10^{42}$ эрг с⁻¹, он находится в спиральной галактике, видимой с ребра, расположенной в 95 Мпк. Считается, что он является черной дырой промежуточной массы с темпом аккреции $M \sim 10^4 - 10^5 M_{\odot}$ (Servillat et al., 2011; Davis et al., 2011; Godet et al., 2012; Webb et al., 2012) со звездой-спутником на эллиптической орбите с периодом в 1 год (Lasota et al. (2011), но см. также Godet et al. (2014)), включенной в молодую звездную систему, например, рассеянное звездное скопление (Farrell et al., 2012). На данный момент, много исследовательских групп осуществляют поиск других кандидатов в черные дыры промежуточных масс, похожих на ESO 243–49 HLX–1. Существует две основные стратегии поиска: 1) исследуя “хвост” в распределении светимости ультраярких рентгеновских источников (e.g. Sutton et al., 2012), и 2) изучая нижнюю границу распределения масс сверхмассивных черных дыр, используя различные шкалирующие соотношения для карликовых галактик (e.g. Greene & Ho, 2004). Для первого варианта обычно используют ULX каталоги, такие как Liu & Mirabel (2005) и Walton et al. (2011). Хотя эти каталоги содержат значительное число источников, однако среди них не так много родительских галактик ULX, которые ищутся путем перекрестного сопоставления между каталогом источников *XMM-Newton* и каталогом близлежащих галактик, таких как каталог RC3 (Third Reference Catalogue of Bright Galaxies), содержащий $\simeq 23000$ галактик (de Vaucouleurs et al., 1991). Поле каталога RC3 хорошо покрыто рентгеновскими наблюдениями и следовательно является хорошей базой для исследований ULX. Тем не менее для наших целей, этот каталог содержит не достаточный объем данных для поиска (особенно это важно для таких редких объектов, как аккрецирующие черные дыры промежуточных масс) по сравнению с современными большими галактическими обзорами. Чтобы преодолеть эти ограничения, мы предлагаем расширенный подход для поиска HLX-кандидатов. На первом шаге мы проводим кросс-корреляцию между каталогом *XMM-Newton* (Rosen et al., 2016) и одним из самых больших доступных обзоров галактических красным смещений, Sloan Digital Sky Survey Data Release 12 (Alam et al., 2015), содержащий более 3 миллионов галактик с известными расстояниями до них, используя специальное условие сопоставления. Затем, мы применяем несколько фильтрующих критериев, чтобы удалить большинство из известных “мусорных” объектов, основываясь на распределении энергии в спектре SED (spectral energy distribution) и особенностях рентгеновского спектра. В первой части настоящей главы мы представим метод поиска и, в качестве первых результатов, два HLX кандидата.

Во второй части данные каталога источников *XMM-Newton* используются для поиска внегалактических пульсаров, приведшему к неожиданному обнаружению первого нераскрученного пульсара во внегалактическом шаровом скоплении. Всего известно около 2000 пульсаров, причем большинство составляют *обычные* пульсары с периодами пульсаций от десятков миллисекунд до приблизительно секунды и магнитным полем $\sim 10^{12}$ Гс (Manchester et al., 2005). В большинстве своем эти пульсары вращаются постепенно замедляясь. Однако несколько сотен из них имеют значительно меньшие периоды порядка

миллисекунды, а также магнитные поля порядка $\sim 10^8$ Гс. Считается, что такие миллисекундные пульсары (MSP) являются потомками нейтронных звезд/пульсаров в рентгеновских двойных системах. Аккреция на нейтронную звезду с близкого компаньона, как считается, придает ей угловой момент, со временем раскручивая ее до миллисекундных периодов (Alpar et al., 1982; Radhakrishnan & Srinivasan, 1982). Это уверенно подтверждается как открытием MSP в рентгеновских двойных (SAX 1808.4–3658, Wijnands & van der Klis, 1998), так и наличием киллогерцевых квазипериодических пульсаций у многих маломассивных рентгеновских двойных с миллисекундными периодами вращения нейтронных звезд (см. van der Klis, 1998, и ссылки там). Archibald et al. (2009) показали, что ранее аккрецировавший миллисекундный пульсар FIRST J102347.67+003841.2 недавно прекратил аккрецию, что подтверждает гипотезу о существовании радиопулсаций у вновь раскрученных пульсаров и общую концепцию раскрутки нейтронных звезд (см. Patruno & Watts (2012)).

Многие из известных MSP находятся в Галактических шаровых скоплениях, в которых на конец 2015 было обнаружено почти 140 миллисекундных пульсаров¹. Шаровые скопления — это плотные сферические системы, состоящие из $\sim 10^4$ – 10^6 старых звезд (e.g. Hénon, 1961). Их значительный возраст подразумевает, что они также должны содержать много компактных объектов (e.g. Hut et al., 1992). Звездные сближения, крайне редкие в областях меньшей плотности, могут происходить в шаровых скоплениях на временном масштабе сравнимом или меньшим, чем возраст Вселенной. Это означает, что многие звезды в шаровых скоплениях на протяжении своей жизни участвуют хотя бы в одном тесном сближении. Звездные сближения — это один из важных механизмов формирования двойных систем. Частота событий сближения (Γ), приводящих, например, к приливному захвату (Fabian et al., 1975), пропорциональна сечению взаимодействия, относительной скорости сближения и плотности звезд в скоплении. В шаровых скоплениях существуют как изначально двойные, так и сформировавшиеся после сближений системы. При этом сближения между двойной системой и другой одиночной звездой или двойной системой в шаровых скоплениях должны происходить гораздо чаще из-за больших сечений взаимодействия по сравнению с одиночными звездами, увеличивающих вероятность сближения. Это объясняет обилие разнообразных видов двойных систем и в частности раскрученных пульсаров, наблюдаемых в шаровых скоплениях.

Однако небольшое количество (6) из них имеют периоды больше 0.1 с и не являются полностью раскрученными. Самый долгопериодический из них, B1718–19 в шаровом скоплении NGC 6342, имеет период 1.004 с и магнитное поле $\sim 10^{12}$ Гс, что типично для *обычного* пульсара. Скорее всего это молодой пульсар с характерным возрастом 1×10^7 лет (Lyne et al., 1993). Lyne et al. (1993) предлагают версию, что этот молодой пульсар образовался либо в результате сближения старой нейтронной звезды со звездой скопления, либо в результате коллапса белого карлика вследствие продолжительной аккреции со звезды-донора (Michel, 1987). Verbunt & Freire (2014) предполагают, что нынешний лежащий на главной последовательности компаньон старой нейтронной звезды заменил исходный в результате сближения с обменом.

Вслед за недавним обнаружением когерентных пульсаций у ультраяркого рентгеновского источника (ULX) в галактике M82 (расстояние $\simeq 3.5$ Мпк) в данных *NuSTAR* (Bachetti et al., 2014), которые доказали, что этот яркий источник в действительности является

¹<http://www.naic.edu/~pfreire/GCpsr.html>

нейтронной звездой, мы начали поиск данных в архиве *XMM-Newton* с целью обнаружить похожие источники и исследовать проблему сверхэддингтоновской светимости у нейтронных звезд (см. например [Mushtukov et al., 2015](#); [King & Lasota, 2016](#), для дальнейшего обсуждения).

В второй части данной главы мы описываем анализ, с помощью которого в открытых данных был обнаружен пульсар с периодом 1.2 с в рентгеновской двойной 3XMM J004301.4+413017, находящейся в шаровом скоплении B091D по обозначению Исправленного Болонского каталога (Revised Bologna Catalog) шаровых скоплений M31 (RBC V.5; [Galleti et al., 2004](#)). Для краткости мы будем обозначать пульсар XB091D вслед за наименованием скопления, в котором он находится. Это первый аккрецирующий пульсар с постоянной светимостью, обнаруженный в M31², также он имеет наибольший период из всех известных пульсаров (радио и аккрецирующих) в шаровых скоплениях; его период примерно на порядок больше, чем у раскрученных аккрецирующих пульсаров из двух шаровых скоплений NGC 6440 и Terzan 5 ([Altamirano et al., 2010](#); [Papitto et al., 2011](#)). Отметим, что этот пульсар был также обнаружен [Esposito et al. \(2016\)](#), но эти авторы интерпретируют природу объекта существенным образом иначе. В данном разделе мы обсуждаем возможные эволюционные сценарии, которые могли бы привести к образованию таких медленно вращающихся нейтронных звезд в шаровых скоплениях.

4.1 Гипер-яркие рентгеновские источники

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работе [Zolotukhin et al. \(2016b\)](#).

В данном разделе представлен новый метод поиска ярких рентгеновских источников на окраинах галактик из публично доступных спектральных обзоров в оптическом диапазоне, вместе со статистической характеристикой вероятности случайной проекции рентгеновского источника рядом с оптической галактикой. Используя каталог рентгеновских источников 3XMM-DR5 и спектроскопическую выборку галактик SDSS DR12, с помощью их отождествления по координатам было отобрано 98 кандидатов в гипер-яркие рентгеновские источники (hyper-luminous X-ray sources, HLX) с предполагаемой светимостью в диапазоне $10^{41} < L_X < 10^{44}$ эрг с⁻¹. Для проверки метода мы убедились, что он позволяет выявить уже известные HLX-кандидаты, такие как ESO 243–49 HLX–1 и M82 X–1. Из статистических соображений до 71 ± 11 из этих кандидатов могут быть объектами заднего и переднего плана, не связанными с оптической галактикой. Таким образом, остаются по крайней мере 16 объектов, которые скорее всего являются настоящими HLX. Это дает нам право говорить о существовании популяции гипер-ярких рентгеновских источников. Мы предлагаем два подходящих HLX-кандидата, для которых, используя другие открытые данные, в частности VLA FIRST в радиодиапазоне, UKIDSS в ближнем ИК, *GALEX* в УФ и CFHT Megacam в оптическом диапазоне, мы представляем доказательства того, что эти объекты не являются обычными рентгеновскими источниками переднего или заднего плана, например, активными ядрами галактик, объектами типа BL Lac, Галактическими рентгеновскими двойными или близкими коронально-активными звездами. Тем

²Другими известными пульсирующими рентгеновскими источниками в M31 являются транзитный кандидат в пульсары XMMU J004415.8+413057 с периодом 197 с в массивной рентгеновской двойной ([Trudolyubov et al., 2005](#)), а также два источника со сверхмягким спектром, представляющие собой аккрецирующие белые карлики: XMMU J004252.5+411540 с периодом 217.7 с ([Trudolyubov & Friedhorsky, 2008](#)) и XMMU J004319.4+411759 с периодом 865.5 с ([Osborne et al., 2001](#)).

не менее требуются дополнительные рентгеновские и оптические наблюдения, чтобы окончательно подтвердить связь этих объектов с хозяйскими галактиками и, таким образом, классифицировать их как HLX.

Данный раздел организован следующим образом. В Части 4.1.1 мы описываем наш метод поиска HLX-кандидатов и использованные способы очистки выборки от нежелательных объектов переднего/заднего фона таких классов, как активные ядра галактик, звезды и т.д. В Разделе 4.1.2 мы представляем детали нашего анализа данных. В Разделе 4.1.3 мы представляем два кандидата и их наблюдательные характеристики. Разделы 4.1.4 и 4.1.5 посвящены обсуждению предложенных кандидатов и выводам.

4.1.1 Создание выборки

Цель данного исследования — поиск на периферии галактик рентгеновских источников со светимостью в диапазоне $10^{41} < L_X < 10^{44}$ эрг с⁻¹, похожих на ESO 243–49 HLX–1. Этот рентгеновский объект находится на расстоянии 8'' от ядра хозяйской спиральной галактики, и его спектральные состояния похожи на состояния аккрецирующих черных дыр стандартных звездных масс, а именно в самом высоком состоянии — мягкий степенной закон с показателем 3, более резкий степенной закон $\Gamma = 2.2$ и чернотельная компонента диска с температурой $T \simeq 0.2$ кэВ в высоком мягком состоянии, и обычный степенной закон с показателем 1.4–2.1 в низком жестком состоянии (Godet et al., 2009; Servillat et al., 2011; Godet et al., 2012). Его светимость изменяется почти на два порядка величины между низким и высоким состоянием, от 2×10^{40} эрг с⁻¹ до $\simeq 1 \times 10^{42}$ эрг с⁻¹ в полосе 0.2–10 кэВ. Наблюдательные характеристики ESO 243–49 HLX–1 определили наши основные критерии поиска: нас интересуют рентгеновские источники на окраинах галактик с известным расстоянием, чтобы была возможность оценки рентгеновской светимости по наблюдаемому потоку. В то же время мы выбираем рентгеновские источники с предполагаемой светимостью в диапазоне $10^{41} < L_X < 10^{44}$ эрг с⁻¹, которые соответствуют массам от нескольких сотен до $\times 10^5 M_\odot$ в простейшем предположении черной дыры, аккрецирующей на эддингтоновском пределе. Мы, однако, не налагаем никаких ограничений на форму рентгеновского спектра или переменность выбранного рентгеновского источника, потому что неясно, уникальны ли эти характеристики для ESO 243–49 HLX–1 или нет. Мы решили работать с каталогом *XMM-Newton* и взяли его за базовый список рентгеновских источников, поскольку *XMM-Newton* имеет неплохое пространственное разрешение 15'', хорошую чувствительность при большом поле зрения, а также весьма широкий рабочий диапазон по энергии фотонов (см. Раздел 1.2). Использовался недавний релиз 3XMM-DR5 (Rosen et al., 2016), ставший самым большим публично доступным каталогом рентгеновских источников.

На протяжении всего раздела мы ссылаемся на свойства источников в том виде, как они обозначены в опубликованных файлах каталога 3XMM-DR5. В качестве первого шага нашего поиска мы применили определенный фильтр к объектам из каталога. Мы выбирали только точечные источники (с `sc_ext_m1 = 0` в каталоге), имеющие уровень обнаружения `sc_det_m1 > 8`, что соответствует уровню значимости $\approx 3.4\sigma$, чтобы избежать ложных объектов. Признак точечности в каталоге выставляется в том случае, если попытка аппроксимации профиля яркости источника функцией рассеяния точки (PSF), свернутой с β -моделью для протяженных источников, дает размерный параметр меньше, чем $6''^3$. Этот

³См. детальное описание этой процедуры в документации к каталогу *XMM-Newton* на странице <http://xmmssc-www.star>.

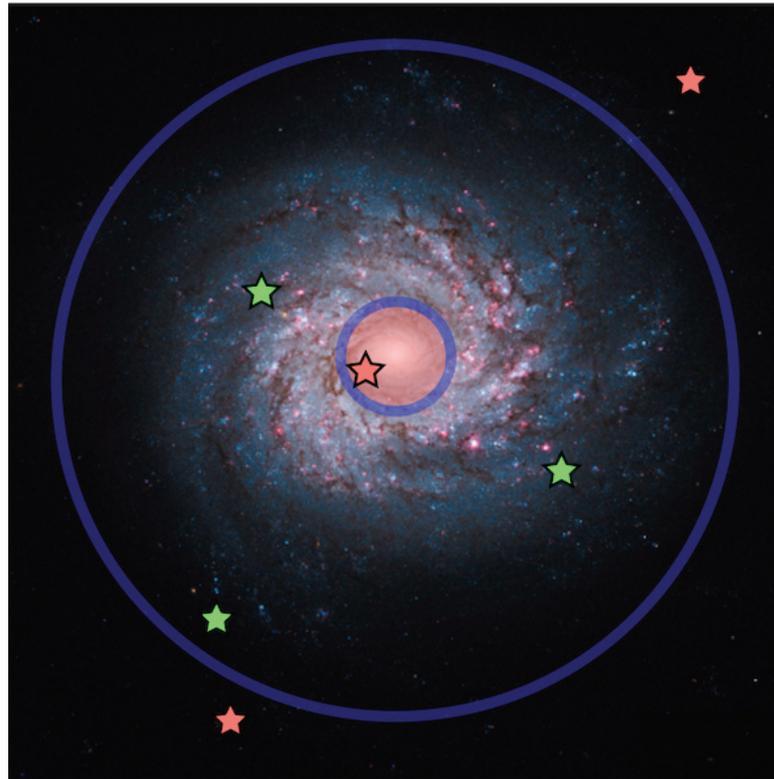


Рис. 4.1: Иллюстрация метода внеядерного отождествления по координатам. Оптические (галактика) и точечные рентгеновские источники (представлены зелеными и красными звездочками) считаются соответствующими друг другу, если рентгеновский источник лежит в пределах двух петросьяновских радиусов от центра галактики (внешний круг), но дальше, чем круг меньшего радиуса, который представляет собой область ядра галактики. Рентгеновские объекты, удовлетворяющие этому условию, обозначаются зелеными звездочками, не удовлетворяющие — красными. Исключение центральной области необходимо для удаления из выборки активных ядер галактик, не представляющих интереса в данном исследовании.

фильтр вернул 309 327 источников из оригинального списка в 396 910 объектов, содержащихся в каталоге. Затем мы осуществили отождествление по координатам (см. Рис. 4.1 для иллюстрации алгоритма) этого списка рентгеновских источников со спектроскопической выборкой из каталога SDSS DR12 (Alam et al., 2015), исключая объекты в окрестности ядер галактик.

Рентгеновский источник отбирается для дальнейшего анализа, если его расстояние от центра галактики больше r_{in} и меньше r_{out} , которые вычисляются индивидуально для каждой потенциальной пары галактика/рентгеновский источник. *Внутренний радиус* r_{in} нужен для того, чтобы исключить источники, которые сложно отличить от активных ядер галактик, или для которых невозможно избежать помех от них. Мы принимаем r_{in} равным $3 * \text{sc_poserr}$, но не менее, чем $5''$ (sc_poserr — это 1σ ошибка положения рентгеновского источника, ее среднее значение в нашей выборке $\sim 1.4''$). Минимальное значение r_{in} выбрано таким же, как в работе Walton et al. (2011) Учтем также, что вообще говоря точность астрометрии в каталоге 3XMM-DR5 значительно лучше, чем в 2XMMi-

DR3 (Rosen et al., 2016), данные из которого были использованы в Walton et al. (2011).

Внешний радиус r_{out} был выбран таким, чтобы максимизировать вероятность истинной ассоциации данного источника с галактикой. Мы использовали $r_{\text{out}} = 2 * \text{petroRad}_r + 3 * \text{sc_poserr}$, где petroRad_r — петросьяновский радиус (Petrosian, 1976) галактики в фильтре r по данным SDSS. Петросьяновский радиус определяется с использованием формы азимутально-усредненного профиля яркости, при этом в SDSS полный поток от галактики оценивается в пределах удвоенного петросьяновского радиуса (petroMag). В данной работе мы используем петросьяновский радиус вместо D_{25} , диаметра изофоты на уровне 25 зв. вел.·угл. сек⁻². (приводимого, например, в популярном каталоге RC3), который чаще фигурирует в исследованиях ULX, потому, что он дает более однородные данные по потокам, и его можно использовать для всех возможных профилей яркости галактики. В общем случае невозможно определить соотношение между петросьяновским радиусом и D_{25} , поскольку оно зависит от профиля яркости галактики, но бывает, что петросьяновский диаметр оказывается меньше, чем проекция большой оси галактики, измеренная по изофоте 25 зв. вел.·угл. сек⁻².

В результате описанного выше внеядерного отождествления по координатам мы получили список пар рентгеновский источник/галактика. Далее не составляет труда вычислить светимость каждого рентгеновского источника в предположении, что он действительно связан с соответствующей галактикой с известным расстоянием, а не случайно на нее проецируется. Выполнив эту процедуру, мы выбрали только те источники, которые удовлетворяли нашим критериям по светимости для HLX-кандидатов: $10^{41} < L_X < 10^{44}$ эрг с⁻¹. На данном этапе мы также ограничили наше исследование объектами на расстоянии меньше 800 Мпк, что для объектов со светимостями на нижней границе интересующего нас диапазона примерно соответствует пределу по чувствительности *XMM-Newton*. После этого фильтра промежуточный список включал 373 объекта.

Очевидно, данная промежуточная выборка содержит рентгеновские объекты как переднего, так и заднего плана, случайно проецирующиеся на оптические изображения галактик. Поскольку нас интересуют только кандидаты в гипер-яркие рентгеновские источники, ниже мы будем называть другие типы источников (которые, как мы полагаем по умолчанию, не связаны с соответствующей галактикой), такие как активные ядра галактик, рентгеновские звезды, катаклизмические переменные и так далее, “загрязняющими” объектами. Главными типами таких нежелательных объектов могут быть *фоновые* AGN, *фоновые* объекты типа VL Lac, *фоновые* галактики со вспышкой звездообразования, компактные объекты или звезды *переднего плана*, находящиеся в нашей Галактике.

Мы попытались решить проблему очистки наших HLX-кандидатов от *загрязнения*, используя свойства широкополосных распределений энергии в спектрах (SED) разных типов объектов и, в частности, отношение потоков в рентгеновском и оптическом диапазонах. Для вычисления этого отношения мы использовали рентгеновские потоки в стандартной полосе каталога *XMM-Newton* 0.2–12 кэВ и оптические потоки в фильтре r обзора SDSS. Стоит заметить, что отношения f_X/f_{opt} , взятые из литературы, сильно неоднородны в плане фактически использованных полос пропускания, поэтому ниже мы также будем пытаться переводить эти значения в ту же систему измерений или же указывать, что точность оценки неизвестна. Отношение потоков в рентгеновском и оптическом диапазоне f_X/f_{opt} для ESO 243–49 HLX–1 как правило велико, больше 100, судя по оптическим и рентгеновским данным из работы Webb et al. (2014). При этом амплитуда вариации блеска

≈ 50 в рентгеновском диапазоне и порядка единицы в оптическом. Для типичных ULX $f_X/f_{\text{opt}} \sim 10^2\text{--}10^3$ (Tao et al., 2011). Основные засоряющие типы объектов — активные ядра галактик и звезды переднего плана — имеют с другой стороны довольно низкие отношения потоков в оптическом и рентгеновском диапазонах: они весьма редко они превышают 10 для активных ядер галактик, и всегда меньше 0.1 для звезд. Однако, далекие активные ядра галактик могут достигать рекордных значений отношений потоков: 10^2 и более (Mignoli et al., 2004; Bauer et al., 2004). Данный тип объектов с экстремальными отношениями f_X/f_{opt} появляется на потоках ниже нескольких $\times 10^{-14}$ эрг с^{-1} см^{-2} (например, Comastri et al. (2002), см. также рис. 7 в статье Bauer et al. (2004) и рис. 1 в работе Mignoli et al. (2004)). Чтобы уменьшить их нежелательный вклад в нашу выборку, мы ввели ограничение по потоку в $f_X > 5 \times 10^{-14}$ эрг с^{-1} см^{-2} для промежуточной выборки, что дало нам финальный список из 98 HLX-кандидатов, который мы назовем базовой выборкой. Все детали процесса отбора и метода внеядерного отождествления по координатам, включая использованные нами запросы к базам данных, приведены в Разделе 4.1.6. Таблицы с промежуточной и основной выборкой наших HLX объектов могут быть легко получены с помощью применения данных запросов в сервисе SDSS CasJobs.

4.1.1.1 Оценка нежелательного вклада фоновых источников

Мы оценили ожидаемый вклад от нежелательных объектов в нашей основной выборке. Мы следуем процедуре, описанной в статье Walton et al. (2011), но с небольшими изменениями: для простоты мы не принимаем в расчет различную чувствительность наблюдений XMM-Newton, аккуратный учет которой сможет лишь уменьшить более реалистичную оценку вклада “мусора”. Таким образом, приведенная здесь оценка является верхним пределом количества нежелательных объектов в финальной выборке HLX-кандидатов. На этом этапе у нас есть 33 879 галактики из спектроскопической выборки SDSS DR12, которые попадают в область покрытия каталога 3XMM-DR5. По сути мы используем их в качестве начального списка для нашего метода внеядерного отождествления по координатам. Это галактики, находящиеся на расстояниях меньше 800 Мпк и имеющие петросьяновский радиус более $2.5''$ (в противном случае область поиска станет нулевой по нашему критерию исключения центральных областей галактик). Зона охвата наблюдений 3XMM-DR5 определена по предварительным картам покрытия в формате MOC (Multi-Order Coverage), которые были получены комбинированием изображений⁴. Это простейшая доступная оценка зоны покрытия каталога не учитывает карту экспозиций и переменную чувствительность наблюдений, поэтому число SDSS галактик внутри нее может считаться за верхний предел числа объектов, которые мы проверили нашим методом отождествления по координатам. Тем же образом, как и в работе Walton et al. (2011), для каждой галактики из обзора SDSS, попавшей в зону покрытия 3XMM-DR5, мы вычислили число нежелательных объектов в соответствующем ей телесном угле (с вычтенной областью ядра), применяя соотношение $\log N - \log S$ для разрешенных рентгеновских фоновых источников в жестком (2–10 кэВ) диапазоне из работы Moretti et al. (2003). Мы использовали следующие формулы для подсчета индивидуального предела чувствительности для каждой галактики:

$$S = \alpha \cdot \max\left(f_{X_{\text{lim}}}, \frac{L_{X_{\text{min}}}}{4\pi d^2}\right) \quad (4.1)$$

⁴Карта покрытия доступна на странице <http://xmm-catalog.irap.omp.eu/links>.

в $\text{эрг с}^{-1} \text{см}^{-2}$, где $\alpha = 0.7$ — это множитель из работы [Walton et al. \(2011\)](#), учитывающий среднюю долю наблюдаемого потока в жестком диапазоне (2–12 кэВ) по отношению к потоку в полном диапазоне *XMM-Newton* 0.2–12 кэВ; $f_{X_{\text{lim}}} = 5 \times 10^{-14} \text{ эрг с}^{-1} \text{см}^{-2}$ — это нижний предел рентгеновского потока по нашим критериям поиска, d — это фотометрическое расстояние, вычисленное по красному смещению в рамках стандартной космологии в сервисе SDSS CasJobs. Индивидуальная предельная чувствительность S дальше подставляется в выражение $\log N - \log S$ из работы [Moretti et al. \(2003\)](#), чтобы получить ожидаемое число источников фона выше этого предела $N(> S)$ в телесном угле поиска конкретной галактики. Мы не ожидаем сколько-нибудь значительных поправок к нашей оценке вклада нежелательных объектов из-за разницы в диапазонах энергий между жесткой полосой по [Moretti et al. \(2003\)](#) и полной полосой в *XMM-Newton*.

Наконец, после сложения количества фоновых источников, посчитанных для предела чувствительности и телесного угла каждой галактики, мы получаем полное число 71 ± 11 нежелательных объектов, которое ожидается в нашей выборке из 98 кандидатов в HLX. Данная оценка ошибки соответствует 15% неопределенности числа источников в [Moretti et al. \(2003\)](#). В этой работе авторы использовали несколько широкополосных и узконаправленных рентгеновских обзоров для вычисления соотношения $\log N - \log S$. В ней описывается детальное сравнение результатов с литературой из которого следует, что представленная модель космического рентгеновского фона согласуется с другими исследованиями в пределах ошибок, и нет причин предполагать какую-либо систематику. Тем не менее мы перепроверили наши оценки количества нежелательных объектов в выборке, используя другие опубликованные функции $\log N - \log S$. Отметим, что функция [Moretti et al. \(2003\)](#) дает заметно большее число источников фона, чем по данным обзоров *Chandra-COSMOS* и *XMM-COSMOS* ([Elvis et al., 2009](#), см. рис. 9 в) и, следовательно, оценки числа нежелательных объектов по последним должны быть только ниже. В работе [Georgakakis et al. \(2008\)](#) скомбинировано несколько обзоров, таких как CDF-N, CDF-S, EGS и XBOOTES, на основании которых авторы оценивают функцию $\log N - \log S$ для мягкого (0.5–2.0 кэВ), жесткого (2–10 кэВ) и общего (0.5–10 кэВ) диапазонов. Использование функции $\log N - \log S$ для жесткого диапазона из статьи [Georgakakis et al. \(2008\)](#) (приравнивая $\alpha = 0.7$ в уравнении 4.1) дает в результате оценку в 59 мусорных объектов в нашей выборке. С соотношением в полном диапазоне из той же работы (полагая $\alpha = 1$) получаем верхнюю оценку в 73 нежелательных объекта. Оба метода согласуются с [Moretti et al. \(2003\)](#) в статистическом смысле, и мы используем его результаты в нашем исследовании.

В рамках этого простого подхода к оценке вклада нежелательных объектов мы не принимали во внимание выпадающие области — например, пробелы на стыке ПЗС матриц на детекторах *XMM-Newton* и пересечение телесных углов поиска некоторых галактик между собой — и то, и другое только уменьшает суммарный телесный угол поиска и, следовательно, более реалистичную оценку загрязнения. Кроме того, никак не учитывалось влияние поглощения потока фоновых источников газом и пылью галактик, через которые они видны. Возможно, более всего важно то, что мы не делали корректировку на переменную предельную чувствительность наблюдений, как это сделано в работе [Walton et al. \(2011\)](#), потому что в момент проведения исследования для последнего релиза каталога 3XMM-DR5 не существовало сервиса определения верхнего предела потока по уровню фона изображения, наподобие [Flix⁵](#) доступного для более старых релизов каталога.

⁵www.ledas.ac.uk/flix/flix3.html

Очевидно, что упомянутые выше эффекты вместе с переоценкой глубины рентгеновских наблюдений для части из 33 879 галактик входной выборки, предел обнаружения которых выше наших оценок S для них, будут только уменьшать долю нежелательных объектов в финальной выборке HLX-кандидатов, поэтому оценка $72 \pm 11\%$ является консервативным верхним пределом на их вклад.

4.1.1.2 Финальная выборка

Верхний предел доли нежелательных объектов в 72% позволяет нам считать, что в нашей базовой выборке из 98 объектов есть, по крайней мере, несколько подходящих кандидатов. В идеале нам необходимо получить оптические спектры этих объектов, чтобы подтвердить, что расстояния до HLX-кандидатов на самом деле такие же, как и до их предполагаемых хозяйских галактик. Однако, глубокая спектроскопия всех 98 объектов представляет собой масштабный наблюдательный проект, поэтому в настоящем разделе в качестве первого шага мы представим небольшой набор данных для HLX-кандидатов, для которых мы нашли в Виртуальной Обсерватории свидетельства того, что их наблюдательные свойства отличаются от характеристик основного типа нежелательных объектов — активных ядер галактик.

Мы использовали несколько критериев, основанных на анализе распределений энергии в спектре объектов нашей базовой выборки. Как отмечалось выше, мы ограничили выборку источников $f > 5 \times 10^{-14}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$, чтобы отфильтровать активные ядра галактик с экстремальными отношениями потока в рентгене к оптическому потоку. Однако, не только далекие активные ядра галактик с высоким поглощением с потоками ниже данного предела имеют высокое отношение потоков рентген–оптика. Обычные AGN со значениями $f_X/f_{\text{opt}} = 1$, видимые сквозь существенное поглощение на луче зрения (например, галактику переднего плана), могут иметь значительные отношения потоков рентген–оптика. Примером такого случая яркого ULX-кандидата с наблюдаемой $f_X/f_{\text{opt}} \simeq 100$ является объект, открытый [Miniutti et al. \(2006\)](#) и позже классифицированный [Dadina et al. \(2013\)](#) как поглощенный AGN с изначальным отношением до поглощения $f_X/f_{\text{opt}} \simeq 6$. Недавно [Sutton et al. \(2015\)](#) получили оптический спектр другого HLX-кандидата 2XMM J134404.1~271410 с $f_X/f_{\text{opt}} \simeq 50$, оказавшегося квазаром на красном смещении $z \simeq 2.84$, видимым через близкую галактику IC 4320. В тоже самое время известны несколько ULX с небольшими значениями $f_X/f_{\text{opt}} \lesssim 100$ — например, из-за того, что они расположены в оптически-ярких регионах III в своих хозяйских галактиках или показывают значительную переменность ([Tao et al., 2011](#); [Heida et al., 2013](#)).

Один из возможных путей решения проблемы этого значительного перекрытия по значениям отношения потоков f_X/f_{opt} активных галактических ядер и компактных аккрецирующих объектов — это сопоставление потоков в рентгеновском и ближнем инфракрасном (NIR) диапазонах, поскольку NIR менее чувствителен к поглощению по сравнению с оптическим диапазоном. Ниже мы ссылаемся на поток в фильтре K как на поток NIR. Легко оценить, что поглощение на луче зрения порядка $n_H = 10^{22} \text{ см}^{-2}$ с нормальным соотношением газ–пыль увеличивает отношение потоков рентген–оптика для фонового AGN в $\simeq 70$ раз, в то время как f_X/f_{NIR} — всего в 1.05 раза. Кроме того, отношения потоков рентген–оптика для таких объектов, как ERO (extremely red objects), достигают экстремальных значений сотен и даже тысяч ([Mignoli et al., 2004](#)), но при этом имеют умеренные значения $f_X/f_{\text{NIR}} \lesssim 25$. В выборке ULX-кандидатов, которые наблюдались в ближнем ИК

диапазоне Heida et al. (2014), активные ядра галактик, видимые сквозь галактики переднего плана обладают в среднем $f_X/f_{\text{NIR}} \lesssim 10$, в то время как ULX имеют отношение более, чем $\simeq 40$ (например, для XMMU J024323.5+372038 в NGC 1058 и RX J004722.4-252051 в NGC 253) и даже $\simeq 2000$ (для Holmberg II X-1).

Основываясь на этих рассуждениях, мы решили начать изучение нашей базовой выборки с поиска в данных Виртуальной Обсерватории без получения новых наблюдений тех из наших HLX-кандидатов, которые удовлетворяют критериям $f_X/f_{\text{opt}} > 100$ или $f_X/f_{\text{NIR}} > 40$. Заметим, однако, что HLX-кандидаты, не удовлетворяющие этим критериям, все же имеет смысл исследовать в дальнейшем.

На первом шаге данного выбора “тихих” в оптическом/ближнем ИК диапазоне объектов, мы применяем следующий критерий, основанный на данных SDSS. Отсутствие оптического источника вплоть до предела SDSS (22.2 зв. вел. в системе AB в фильтре r) в области 3σ неопределенности рентгеновского положения дает нижний предел по отношению $f_X/f_{\text{opt}} \gtrsim 10$ для нижней границы рентгеновского потока нашей выборки ($f_X = 5 \times 10^{-14}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ в стандартной полосе XMM-Newton в 0.2–12 кэВ). Выберем теперь из нашего базового списка те источники, которые имеют оптический объект в фотометрической базе SDSS DR12 в области 3σ неопределенности рентгеновского положения. Таким образом, этот 61 источник с оптическими двойниками имеет $f_X/f_{\text{opt}} \lesssim 10$. Скорее всего они представляют собой далекие AGN, которые доминируют в разрешаемом рентгеновском фоне на потоках $f_X > 5 \times 10^{-14}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$. Заметим, что это число находится в согласии с нашей оценкой количества нежелательных объектов, полученной выше. Отбросив оптически-яркие объекты мы получим 37 оптически-слабых источников для дальнейшего исследования.

Известные HLX-кандидаты, такие как ESO 243–49 HLX–1 и M82 X–1, не попали в нашу базовую выборку ввиду неполноты данных обзора оптических красных смещений, который мы использовали, поскольку обзор SDSS DR12 не покрывает все небо. При тестировании нашего метода с использованием других баз данных красных смещений галактик — например, базы HyperLEDA — мы сможем восстановить эти кандидаты в HLX. Новые HLX-кандидаты из других баз красных смещений будут представлены в продолжении данного исследования в будущем.

Чтобы усилить полученный предел $f_X/f_{\text{opt}} \gtrsim 10$, мы сделали запрос в Канадский Центр Астрономических данных (CADC), который содержит оптические данные с Космического Телескопа им. Хаббла, CFHT Megacam, WIRCam и других инструментов. Мы использовали веб-сервис ВО доступа к таблицам (Table Access Protocol, Dowler et al. (2011)) в CADC, который показал наличие изображений для 5 из 37 объектов. Затем мы проанализировали эти глубокие оптические снимки. Для одного объекта (XMM 1226+12, см. ниже) мы нашли подтверждение, что он соответствует выбранному нами ограничению $f_X/f_{\text{opt}} > 100$. Оставшиеся 4 объекта либо имеют оптический двойник и $f_X/f_{\text{opt}} \simeq 20$ –50 или не имеют оптических двойников, но проецируются на диффузное свечение хозяйской галактики, поток от которой позволяет получить недостаточно строгий низкий предел в $f_X/f_{\text{opt}} \gtrsim 30$. Помимо поиска в Виртуальной Обсерватории мы начали наблюдательную программу по спектроскопии HLX-кандидатов в оптическом/ближнем ИК диапазонах, чтобы получить убедительные доказательства связи рентгеновских источников с положительными хозяйскими галактиками и/или улучшить ограничения f_X/f_{opt} и f_X/f_{NIR} , которые можно получить из существующих в ВО данных.

Мы развили дальше идею удаления других типов нежелательных объектов, используя их широкополосные спектральные характеристики. На Рис. 4.2 мы нанесли распределения энергии в спектре в диапазоне от радио до рентгена, нормированные на минимальный рентгеновский поток источников из нашей выборки $f_X = 5 \times 10^{-14}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$, для нескольких нежелательных типов объектов: активных ядер галактик, галактик со вспышкой звездообразования (Ruiz et al., 2010) и объектов типа BL Lac (Nieppola et al., 2006). При добавлении на эту диаграмму пределов чувствительности некоторых других публично доступных больших фотометрических обзоров неба в диапазоне от радио до ближнего ИК и ультрафиолета (УФ), сразу же становится ясно, что обнаружение объекта в рентгене вместе с отсутствием детектирования его на других длинах волн позволяет исключить нежелательные объекты всех типов, перечисленных выше, за исключением редких блазаров с пиком на высоких энергиях (HBL), которые, однако, могут быть отброшены на более поздних этапах при изучении спектров рентгеновского излучения, так как они обладают характерным жестким плоским спектром. Мы использовали следующие обзоры в других диапазонах длины волны: UKIRT Infrared Deep Sky Survey (UKIDSS) в ближнем ИК (Lawrence et al., 2007), Galaxy Evolution Explorer (*GALEX*) в УФ (Martin et al., 2005) и VLA FIRST (Becker et al., 1995) в радио,— доступ к которым легко получить через Виртуальную Обсерваторию. Мы проделали отождествление по координатам в пределах 3σ неопределенности положений каждого объекта из нашей базовой выборки, учитывая типичное для каждого из обзоров разрешение: UKIDSS Data Release 10+ (1" разрешение), *GALEX* Data Release 6 (3" разрешение) и VLA FIRST (5" разрешение). Это было сделано с помощью программы TOPCAT Виртуальной Обсерватории (Taylor, 2005) и программы для просмотра изображений CDS ALADIN (Bonnarel et al., 2000) — эти результаты мы использовали на следующем этапе. Для типичной предельной звездной величины в обзоре UKIDSS $K = 18.3$ зв. вел. (в системе Веги), отсутствие ИК двойника означает отношение потоков рентген–ИК f_X/f_{NIR} для нижней границы рентгеновского потока нашей базовой выборки $f_X = 5 \times 10^{-14}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$. После этой процедуры мы нашли один объект (XMM 0838+24, см. ниже), для которого $f_X/f_{\text{NIR}} > 40$. В следующем разделе мы представляем два отобранных из базовой выборки HLX-кандидата, которые удовлетворяют выбранным выше ограничениям на распределение энергии в спектре.

4.1.2 Анализ данных

В настоящем исследовании мы работали с уже готовыми данными, доступными в Виртуальной Обсерватории. Рентгеновские данные взяты из каталога *XMM-Newton* 3XMM-DR5 (см. описание создания каталога в Разделе 1.2 настоящей диссертации и Rosen et al., 2016), доступного в сети Интернет⁶, и каталога источников *Chandra* релиза 1.1 (Evans et al., 2010), доступ к которому мы получали через сервис CDS VIZIER. К другим каталогам запросы делались через такие инструменты Виртуальной Обсерватории, как CDS ALADIN и TOPCAT.

Для фотометрического и астрометрического анализа калиброванных по потокам оптических и NIR изображений из архива CADC применялась программа SEXTRACTOR (Bertin & Arnouts, 1996) в связке с PSFEX (Bertin, 2011) версий 2.19.5 и 3.17.1, соответственно. В зависимости от показаний встроенного в SEXTRACTOR классификатора галактика/звезда CLASS_STAR и SPREAD_MODEL, мы брали либо PSF, либо петросьяновские звездные величины как оценку потока в оптике и NIR. При отсутствии обнаружения оптического двойника для

⁶<http://xmm-catalog.irap.omp.eu>

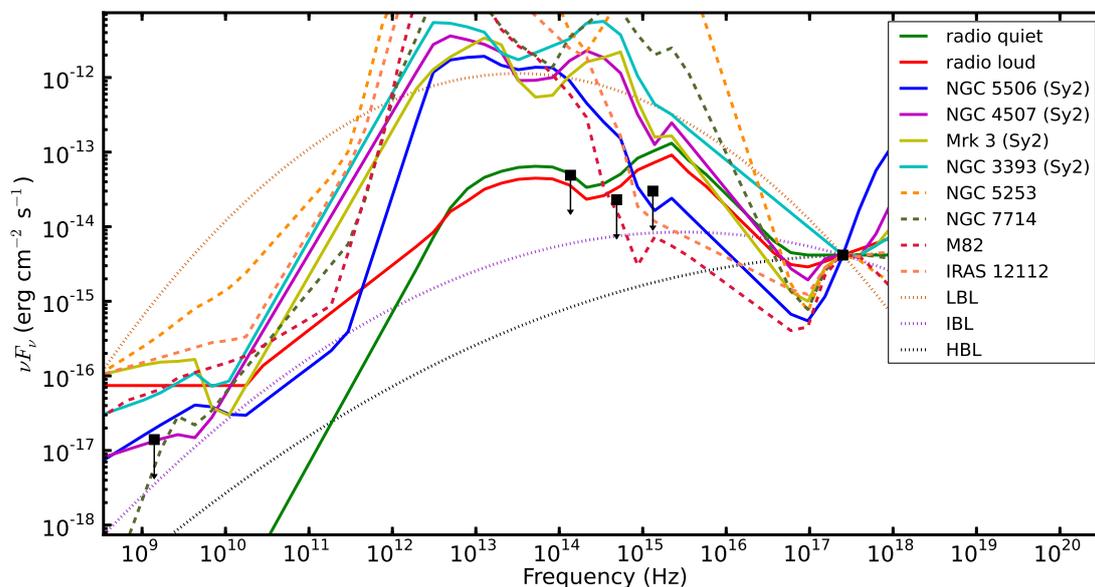


Рис. 4.2: Распределение энергии в спектре в диапазоне от рентгена до радио для активных ядер галактик (жирные линии), галактик со вспышкой звездообразования (пунктирные линии) и объектов типа BL Lac, нормированные на нижний предел рентгеновского потока нашей выборки. Приблизительные пределы потоков для VLA FIRST (1 мЯн на 1.4 ГГц), UKIDSS Large Area Survey в ближнем ИК ($K > 18.1$ зв. вел. в системе Веги), фотометрического обзора SDSS в оптическом диапазоне ($r > 22.2$ зв. вел. в системе AB), GALEX Medium Imaging Survey ($m_{AB} > 23$) в УФ показаны квадратами слева направо, соответственно. Нижняя граница рентгеновского потока нашей выборки (5×10^{-14} эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ в диапазоне от 0.2 до 12 кэВ, который примерно переводится в $\nu F_\nu = 4 \times 10^{-15}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ на 1 кэВ) показана квадратом справа. Очевидно, что основываясь на данных открытых обзоров неба возможно утверждать, что ни AGN, ни галактики со вспышками звездообразования, ни объекты типа BL Lac с пиками на низких энергиях не могут одновременно иметь наблюдаемый рентгеновский поток и отсутствие детектирования в радио/ближнем ИК/оптическом/УФ диапазонах. Объекты BL Lac с пиками на промежуточных и высоких энергиях могут объяснять такое распределение энергии в спектре, но их возможно исключить в ходе детального анализа их характерных жестких рентгеновских спектров, либо получив более сильные ограничения в оптике и ближнем ИК. Данные распределений энергии в спектре взяты из Ruiz et al. (2010) для всех объектов, кроме блазаров, которые взяты из Nieppola et al. (2006).

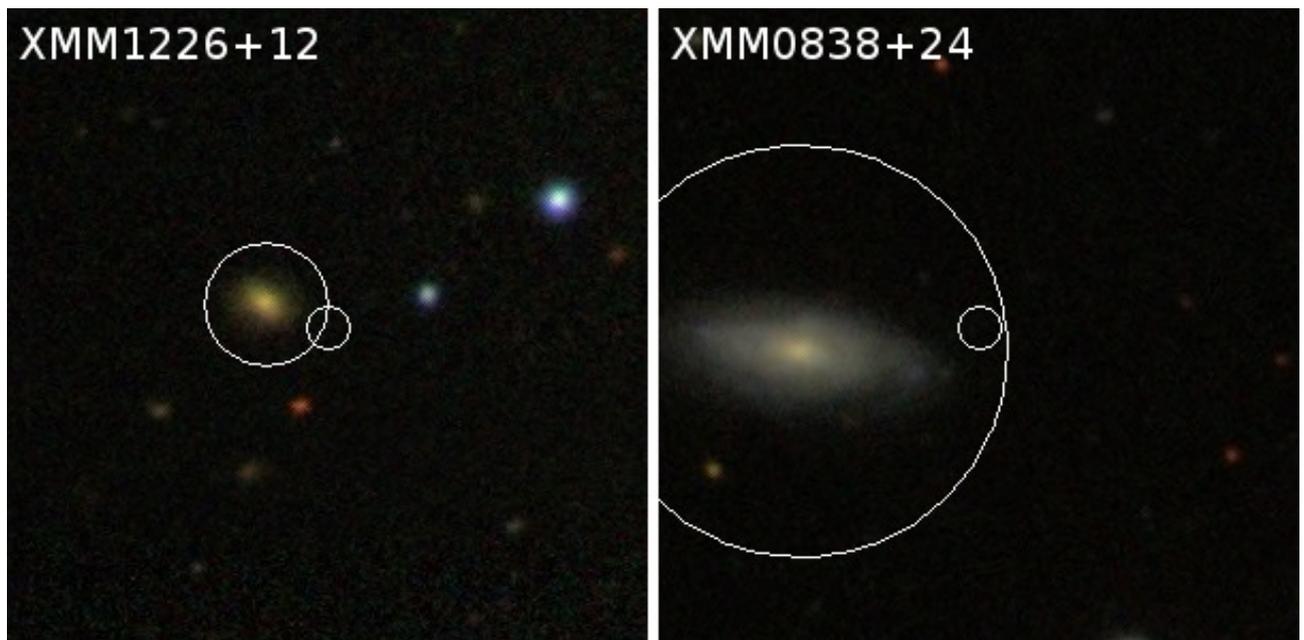


Рис. 4.3: Изображения предполагаемых хозяйских галактиками двух HLX-кандидатов из обзора SDSS DR12. Размер каждой области $1'$, север вверху, восток слева. Маленькие окружности в центре каждого изображения соответствуют 3σ неопределенности рентгеновского положения из каталога 3XMM-DR5. Большие окружности имеют радиус $2\times$ петросяновского радиуса предполагаемой хозяйской галактики и представляют собой одну из оценок оптических границ галактики. В левом верхнем углу каждой панели приводится соответствующий идентификатор объекта.

Источник ID	Обозначение	RA J2000	Dec J2000	Ошибка положения угл. сек.	l град.	b град.
201082602010056	XMM 1226+12	12:26:47.76	+12:55:04.2	1.0	279.6357	74.6640
203022602010004	XMM 0838+24	08:38:39.47	+24:53:09.5	0.9	199.8610	33.7771

Таблица 4.1: Позиционная информация об HLX-кандидатах. Идентификаторы источника приведены из `srcid` столбца каталога 3XMM-DR5, ошибка положения представляет собой 1σ неопределенность рентгеновских координат, l и b — Галактическая долгота и широта, соответственно.

оценки верхнего предела мы использовали либо измеренные PSF звездные величины объектов на кадре с отношением сигнал/шум 5, либо значения из программы-калькулятора времени экспозиции соответствующего прибора, либо оценку предела изображения в заголовке файла, вычисленную при редукции программой обработки данных — в зависимости от того, что ярче.

Мы использовали следующий метод расчета отношений f_X/f_{opt} и f_X/f_{NIR} . Рентгеновский поток f_X был взят из 3XMM-DR5, если не указано иное. Для оптического потока f_{opt} мы сначала переводили литературные данные или оценки из нашей работы в звездные величины в системе AB и таким образом получали оценку спектральной плотности потока. Та же процедура использовалась для вычисления спектральной плотности потока в ближнем ИК диапазоне. Затем, полагая, что спектральная плотность потока меняется незначительно в пределах пропускания фильтров SDSS r и UKIDSS K , мы вычисляли полный поток в фотометрической полосе и использовали его для оценки отношения к f_X .

4.1.3 Результаты

Рентгеновские координаты двух HLX-кандидатов с соответствующими неопределенностями представлены в Таблице 4.1. Основные свойства кандидатов приведены в Таблице 4.2, где мы также приводим некоторые параметры источников, полученные в предположении, что они связаны с оптическими галактиками. Некоторые свойства предполагаемых хозяйских галактик даны в Таблице 4.3. В этом разделе мы обсуждаем известные факты по каждому из HLX-кандидатов.

4.1.3.1 Источник 201082602010056 (= XMM 1226+12)

Объект 3XMM J122647.7+125504⁷ (уникальный номер в *XMM-Newton* каталоге 201082-602010056, в дальнейшем для краткости XMM 1226+12; ту же номенклатуру мы будем использовать для второго HLX-кандидата) наблюдался 1 июля 2002 года в рамках программы ObsID 0108260201. Источник проецируется рядом с галактикой морфологического типа *Sa* (см. ее изображение на Рис. 4.3), которая, судя по ее оптическому спектру из SDSS (а именно, по положению на BPT (Baldwin–Phillips–Terlevich, Baldwin et al., 1981) диаграмме), не является активной. В каталоге *XMM-Newton* приводится поток объекта $f_X = 5.9 \times 10^{-14}$ эрг с⁻¹ см⁻².

Источник присутствует в каталоге Liu (2011) из обзора близких галактик *Chandra*, где авторы предполагают его ассоциацию с галактикой NGC 4406 (M86), находящейся на расстоянии 16.8 Мпк. Угловое расстояние от источника до центра M86 при этом

⁷См. подробнее в каталоге 3XMM-DR5 на странице <http://xmm-catalog.irap.omp.eu/source/201082602010056>

Источник ID	Расст. Мпк	Поток эрг с ⁻¹ см ⁻²	f_X/f_{opt}	Светимость эрг с ⁻¹	Масса M_{\odot}	Расст. до ядра угл. сек.	Ошибка полож. угл. сек.
201082602010056	754	5.7×10^{-14}	$\simeq 200$ (опт.)	4.0×10^{42}	$\simeq 31000$	9.1	1.0
203022602010004	128	1.4×10^{-13}	$\gtrsim 70$ (NIR)	2.7×10^{41}	$\simeq 2100$	24.4	0.9

Таблица 4.2: HLX-кандидаты и некоторые их характеристики. Расстояния определены по красному смещению предполагаемой хозяйской галактики по данным SDSS (см. также Таблицу 4.3 с другими свойствами галактик). Наблюдаемый поток в диапазоне 0.2–12 кэВ взят из каталога 3XMM-DR5. f_X/f_{opt} представляет собой отношение наблюдаемого потока рентгеновского излучения к потоку или верхнему пределу обнаружения оптического или NIR двойника. Светимость вычислена из наблюдаемого рентгеновского потока в предположении, что источник рентгеновского излучения связан с галактикой. Масса рассчитана по светимости с использованием простого эддингтоновского соотношения $L_{\text{Edd}} = 1.3 \times 10^{38} (M/M_{\odot})$ эрг с⁻¹ с округлением до двух значащих цифр. Угловое расстояние рентгеновского источника от ядра галактики дано в угловых секундах. Общая ошибка положения указана в секундах дуги и рассчитана путем комбинирования статистических и систематических ошибок, взятых из каталога 3XMM-DR5 (колонка `sc_poserr`).

Источник ID	SDSS DR12 objid	Морф. тип.	Петрос. рад. угл. сек.	Красное смещ.
201082602010056	1237661813349351502	<i>Sa</i> (?)	4.2	0.158
203022602010004	1237664667887599821	<i>Sc</i>	14.1	0.029

Таблица 4.3: Свойства предполагаемых хозяйских галактик для каждого из выбранных HLX-кандидатов. Типы галактик оценены по SDSS изображениям и спектральной информации, вопросительный знак означает, что классификация не определена.

Фильтр	Дата	Время экспоз. (с)	Предел. вел-на (система АВ)	Кач-во изобр. (угл. сек.)
<i>r</i>	17 янв. 2005	1440	25.4	1.0
<i>r</i>	17 апр. 2005	900	24.8	1.7
<i>u</i>	01 апр. 2008	6984	27.0	0.8
<i>r</i>	03 апр. 2008	4809	26.3	1.0

Таблица 4.4: Наблюдения поля XMM 1226+12 на телескопе CFHT с детектором Megacam, проанализированные в данном исследовании..

составляет $8.9'$. Согласно de Vaucouleurs et al. (1991), большая полуось M86 $D_{25} = 4.5'$. Данные *Chandra* были получены 9 марта 2005 года, измеренный поток был равен $f_X = 9.1 \times 10^{-15}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ в полосе 0.3–8 кэВ. Источник также входит в каталог *Chandra* (Evans et al., 2010) с обозначением CXO J122647.7+125505, его исправленный за апертуру поток (по данным детектора ACIS) оценивается как $f_X = 1.9 \times 10^{-14}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ в полосе 0.5–7 кэВ.

В архиве CADC содержится множество изображений данной области неба, относящейся к скоплению галактик в Деве. Мы проанализировали несколько глубоких кадров Megacam (см. журнал наблюдений в Таблице 4.4). В самой глубокой экспозиции в полосе *r* оптический источник виден в пределах пересечения ошибок положения *XMM-Newton* и *Chandra* (см Рис. 4.4) по координатам RA=12:26:47.77 и Dec=+12:55:06.0. Обозначим его источником А. Он был проклассифицирован программой SEXTRACTOR как галактика, что понятно, поскольку визуально заметна его протяженность. Оценка петросьяновской величины объекта в системе АВ дает $m_r = 24.44 \pm 0.13$, тогда как если предположить, что источник А составной, его яркий компонент моделируется PSF со звездной величиной $m_r = 25.0 \pm 0.1$. Тем не менее, на более короткой экспозиции в фильтре *r* от 17 января 2005 года, источник А едва заметен и классифицируется как звезда с петросьяновской АВ величиной $m_r = 26.0 \pm 0.4$ и PSF величиной $m_r = 25.4 \pm 0.3$. На кадре Megacam, полученном 17 апреля 2005 года с предельной звездной величиной 24.8 на изображении нет источников, видимых в пределах объединенной ошибки положений *XMM-Newton* и *Chandra*. На глубоком кадре в полосе *u* с экспозицией ~ 7 кс и при более хороших погодных условиях источник А можно на пределе разложить на три компоненты, две из которых имеют PSF величину $m_u = 26.4 \pm 0.2$, а третья $m_u = 27.0 \pm 0.3$. Кроме того, другой источник (В) обнаружен на уровне 2.5σ в точке с координатами RA=12:26:47.69 и Dec=+12:55:04.0 в юго-западной области объединенной ошибки положения, он имеет звездную величину $m_u = 27.2 \pm 0.4$. Он также виден на самой глубокой экспозиции в фильтре *r* — таким образом, мы считаем источник В реальным объектом, а не флуктуацией фона.

На снимке этого поля из обзора UKIDSS LAS (с предельной звездной величиной 18.3 в системе Веги) нет никаких объектов, с которыми можно было бы отождествить данный источник.

4.1.3.2 Источник 203022602010004 (= XMM 0838+24)

Объект 203022602010004⁸ (IAU обозначение 3XMM J083839.4+245309) наблюдался на *XMM-Newton* дважды: первый раз 9 апреля 2005 года в рамках наблюдательной програм-

⁸См. подробнее в каталоге 3XMM-DR5 на странице <http://xmm-catalog.irap.omp.eu/source/203022602010004>

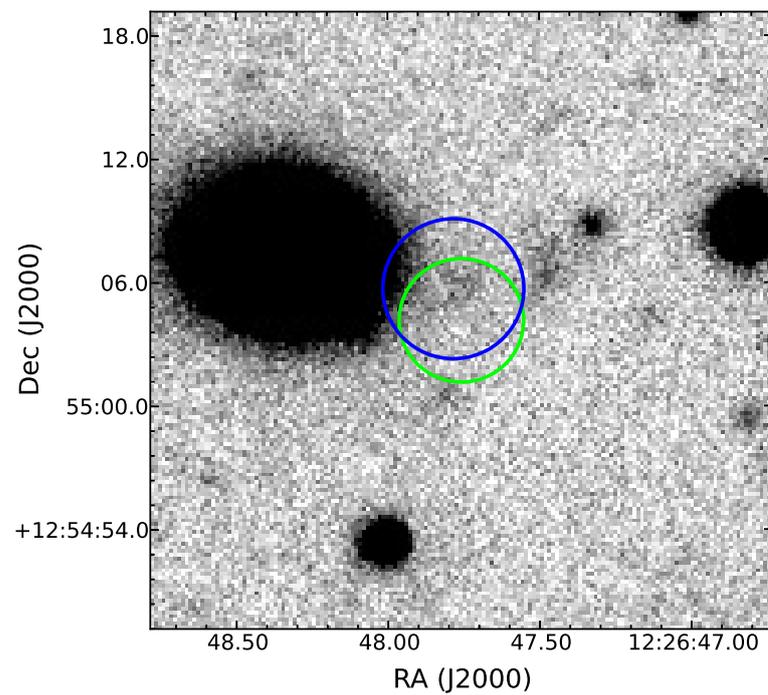


Рис. 4.4: Суммарное изображение CFHT Megacam поля источника XMM 1226+12 в полосе r , полученное 3 апреля 2008 года с экспозицией 4809 с, с нанесенными 3σ неопределенностями положения XMM-Newton (зеленый) и Chandra (синий). Север вверху, восток слева. Протяженный оптический источник виден внутри области перекрытия синей и зеленой окружностей.

мы ObsID 0302260201, а затем 9 октября 2005 года во время наблюдения ObsID 0302260401. Для краткости мы будем называть объект XMM 0838+24. Оба наблюдения *XMM-Newton* этого источника согласуются друг с другом в пределах соответствующих неопределенностей параметров. Источник находится на расстоянии примерно $24.4''$ от ядра *Sc* галактики SDSS J083841.25+245306.3 (см. ее изображение на Рис. 4.3).

Похоже, что XMM 0838+24 ассоциируется с источником 1SXPS J083839.3+245310 из каталога *Swift* (Evans et al., 2014), который находится на расстоянии $3.9''$ от положения объекта *XMM-Newton*. Его поток в полосе 0.3–10 кэВ при аппроксимации спектра степенным законом немного больше, чем в 3XMM-DR5, и составляет $2.9_{-1.1}^{+1.6} \times 10^{-13}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$. *Swift* зафиксировал объект 4 раза в период с 4 октября 2005 г. по 17 декабря 2007 г., и 3 раза при наблюдении этого же поля между 10 октября 2005 г. и 25 ноября 2007 г. источник не был обнаружен, хотя верхний предел на уровне 3σ этих наблюдений был и выше чем средний поток источника, определенный по наблюдениям, когда он был обнаружен. Фотонный индекс для объекта в каталоге 1SXPS довольно жесткий, $\Gamma = 0.0_{-0.7}^{+1.0}$.

Несмотря на то, что отождествление по координатам нашей базовой выборки с каталогом UKIDSS DR10+ не дало никакого результата для данного объекта, мы просмотрели соответствующее поле в фильтре *K* в данных обзора UKIDSS LAS (см. Рис. 4.5). На изображении на пределе с отношением сигнал/шум 3 немного снаружи области неопределенности рентгеновского положения виден слабый объект с координатами RA=08:38:39.28 и Dec=+24:53:08.0 (расстояние от рентгеновского положения $3.1''$, тогда как неопределенность 3σ рентгеновских координат составляет $3.0''$). Его звездная величина, определенная путем аппроксимации профиля яркости эмпирической PSF, составляет $K = 18.9 \pm 0.3$, что несколько лучше типичного предела обнаружения UKIDSS из-за хороших атмосферных условий во время наблюдательной ночи.

4.1.4 Обсуждение

4.1.4.1 Возможная природа двух HLX-кандидатов

Несмотря на то, что мы не можем точно определить природу двух предложенных кандидатов на основе имеющихся данных, возможно оценить их шансы быть объектами обычных типов, не HLX. Ни один из кандидатов не может быть звездой нашей Галактики: помимо критерия f_X/f_{opt} , который использовался в процедуре отбора, звезды легко распознаются на оптических снимках SDSS. Рентгеновские объекты, принадлежащие нашей Галактике также маловероятны, поскольку выборка построена по SDSS обзору, который намеренно охватывает высокие галактические широты, где плотность Галактических объектов крайне низка. Оба наших источника лежат выше Галактической широты $+30^\circ$ (см. Таблицу 4.1).

Например, только 34% известных катаклизмических переменных (CV; см. Раздел 2.1 с описанием их наблюдаемых характеристик) из последнего обновления каталога Ritter & Kolb (2003) имеют модуль Галактической широты более, чем 33° , как у источника XMM 0838+24. Из обзора немагнитных CV (которые составляют большинство местного населения CV), статистически полного до потока $f_X > 10^{-14}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ (Pretorius & Knigge, 2012), мы можем оценить вероятность найти CV в пределах полного телесного угла нашего поиска всего лишь в $\approx 10^{-4}$. Типичный поток в нашей выборке $f_X = 5 \times 10^{-14}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$ соответствует светимости порядка 2.5×10^{33} эрг с^{-1} на мак-

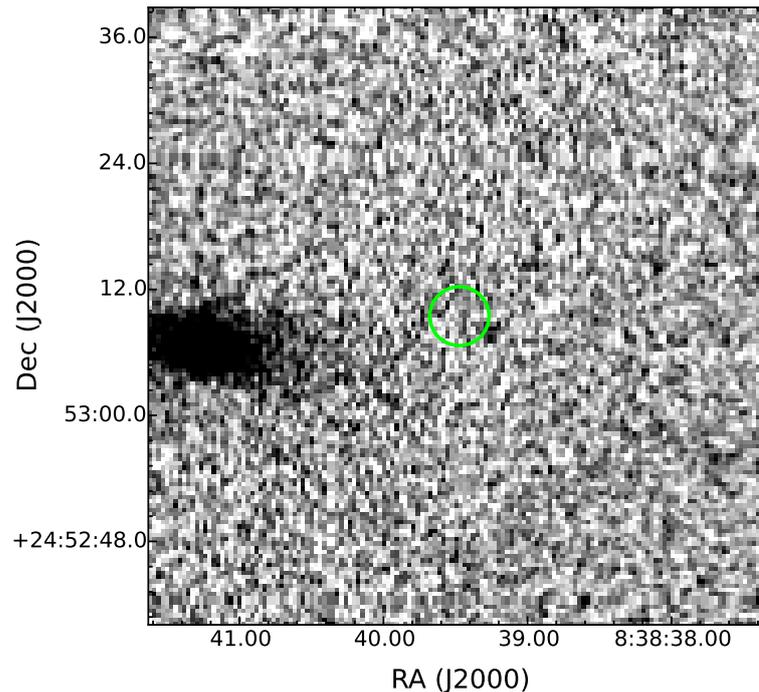


Рис. 4.5: Изображение в фильтре K поля XMM 0838+24 из обзора UKIDSS LAS, полученное 3 мая 2009 года с экспозицией 10 с. Север вверху, восток слева. Показана область 3σ неопределенности рентгеновских координат из каталога *XMM-Newton*. Немного снаружи круга ошибки *XMM-Newton* виден слабый объект.

симальном расстоянии 10 кпк, которое возможно предположить у Галактических объектов на этих широтах. Этот верхний предел светимости намного ниже эддингтоновской светимости для любого типа компактного объекта звездной массы, но все же в пределах разумного диапазона для радиационно неэффективной аккреции на черную дыру. Имеющиеся данные, следовательно, не могут полностью исключить Галактическую природу источников, хотя высокие Галактические широты делают эту гипотезу менее вероятной, особенно для XMM 1226+12, расположенного на широте почти 75° . Ниже мы обсудим другие возможности для каждого из двух источников по отдельности.

Предполагаемая хозяйская галактика источника XMM 1226+12 не имеет признаков AGN, так что маловероятно, что светимость $L_X \approx 4 \times 10^{42}$ эрг s^{-1} (см. таблицу 4.2) связана с центром этой галактики. Происхождение такой рентгеновской светимости в нормальной галактике вряд ли возможно. Оценки потоков, полученные по наблюдениям этого источника на *XMM-Newton* и *Chandra* в разные моменты времени, свидетельствуют о внутренней переменности его рентгеновского излучения, даже с учетом некоторого несоответствия полос пропускания этих инструментов. В свою очередь, факт переменности делает маловероятным объяснение природы данного источника в виде суперпозиции более слабых объектов. На самой глубокой экспозиции этого поля в полосе r имеется протяженный источник А внутри объединенной области неопределенности рентгеновских координат, который разрешается на 3 компоненты на изображении в полосе u , пусть и на довольно низком уровне значимости. Если бы это в самом деле был протяженный объект, он должен был бы быть обнаружен на изображении в фильтре r с 1440-секундной экспозицией примерно на таком же потоке, как и ранее — более высоком, чем предел обнаружения на соответствующем

снимке, чего мы не наблюдаем. Если же это совокупность нескольких точечных объектов, как это следует из анализа изображения в полосе u , то мы увидим только один источник выше предела обнаружения при экспозиции 1440 с. Поэтому мы предполагаем, что источник А представляет собой совокупность нескольких точечных объектов и используем его PSF величину в полосе r , для оценки нижнего предела $f_X/f_{\text{opt}} \simeq 200$. К сожалению, снимок с наименьшей экспозицией 900 с был получен при погодных условиях хуже обычного и имеет предельную величину, которая не позволяет нам ограничить оптическую переменность источника А или его компонентов. Отсутствие обнаружения в ближнем ИК диапазоне в обзоре UKIDSS двойника этого источника означает, что $f_X/f_{\text{NIR}} \gtrsim 17$.

Данный источник вряд ли является фоновым AGN, если принять во внимание высокое значение f_X/f_{opt} и нижний предел f_X/f_{NIR} . Одно из возможных объяснений было предложено в работе Liu (2011), где авторы предположили, что рентгеновский объект связан с галактикой M86, находящуюся на расстоянии 16.8 Мпк. В картинной плоскости XMM 1226+12 находится примерно на расстоянии двух больших полуосей (D_{25}) от центра M86 при позиционном угле 30 градусов по отношению к главной оси, то есть в промежутке между M86 и соседней галактикой NGC 4438, который отчетливо виден как минимум на распределении радиальных расстояний рентгеновских источников M86 из каталога Liu (2011). Если XMM 1226+12 все же принадлежит M86, он может быть маломассивной рентгеновской двойной системой (LMXB) с проекционным расстоянием 43 кпк от центра галактики. В своей работе Liu (2011) оценивают ее рентгеновскую светимость в 3.1×10^{38} эрг с⁻¹, которая возрастает до 2.0×10^{39} эрг с⁻¹, если принять во внимание наблюдаемый поток XMM-Newton. Такая светимость означает, что данный источник является одной из самых ярких черных дыр в LMXB в M86. Однако, если этот рентгеновский объект связан с нашим оптическим источником А или с источником В, при модуле расстояния до M86 в 31 зв. вел. его абсолютная величина в оптике составит $M_r \simeq -5... -6$, что все же несколько ярче, чем можно ожидать от LMXB (van Paradijs & McClintock, 1994; Revnivtsev et al., 2012, и Раздел 2.2). Тогда можно предположить, что это могла бы быть LMXB, расположенная в маломассивном шаровом скоплении (globular cluster, GC), особенно если учесть, что на этом проекционном расстоянии от центра M86 есть $\simeq 3$ скопления на кв. угл. минуту (Rhode & Zepf, 2004), что переводится в вероятность случайной проекции с нашей фоновой галактикой около 10%. Однако цвета обоих источников — и источника А ($u - r \simeq 1.3$), и В ($u - r \simeq 0.9$, учитывая наиболее глубокий предел по звездной величине в фильтре r) слишком синие для GC. Действительно, в каталоге Harris (1996) (редакция 2010 г.) наиболее голубые шаровые скопления имеют цвет $u - r = 1.6-2.0$ ⁹, что хорошо согласуется, например, с цветами карликовых сфероидальных систем (см. Раздел 3.1 настоящей диссертации и в частности Рис. 3.7). Вероятность случайной проекции редкого голубого слабого шарового скопления в M86 с фоновой галактикой пренебрежимо мала. Поэтому маловероятно, что наиболее яркий компонент источника А, либо источник В являются LMXB в поле или в шаровом скоплении, хотя подобного нельзя сказать относительно более слабых источников, которые могут присутствовать внутри кружка ошибок рентгеновского положения XMM 1226+12. Доступные в Виртуальной Обсерватории данные, таким образом, не позволяют полностью исключить возможность объяснения XMM 1226+12 маломассивной рентгеновской двойной системой в M86, поэтому необходимы дополнительные наблюдения для окончательного вывода о

⁹Мы преобразовали цвета из каталога в систему АВ с помощью соотношений из Jordi et al. (2006)

природе источника.

Учитывая принцип построения выборки, отсутствие радио, УФ, оптических и ИК двойников говорит о том, что источник XMM 0838+24 вряд ли является активной звездой, фоновым AGN, галактикой с звездообразованием или низко-/средне-/высокоэнергичным блазаром (см. Рис. 4.2, однако нужно понимать, что обнаруженный рентгеновский поток в любом случае выше 1×10^{13} эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$).

Оценка f_X/f_{NIR} зависит от того, предполагаем ли мы связь данного рентгеновского источника с объектом, который на пределе виден в ближнем ИК диапазоне. Если они связаны, то $f_X/f_{\text{NIR}} \simeq 70$. В противном случае эта оценка становится нижним пределом. Если мы принимаем во внимание максимальный рентгеновский поток из каталога 1SXPS и отсутствие детектирования в ближнем ИК диапазоне, то отношение потоков для XMM 0838+24 становится $f_X/f_{\text{NIR}} \gtrsim 150$.

Светимость источника XMM 0838+24, если он находится в нашей Галактике на расстоянии 10 кпк, равна $\simeq 10^{33}$ эрг $\text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$. Это значение слишком мало для черной дыры в двойной системе с близкими к эддингтоновским темпами аккреции, но вполне может иметь место для изолированной черной дыры, аккрецирующей межзвездную среду (см., например, Maccarone (2005) и ссылки там). В то же время стоит отметить, что наблюдаемый рентгеновский спектр источника XMM 0838+24 не согласуется с предсказаниями для различных видов радиационно неэффективной аккреции, которые, как ожидается, имеют степенной спектр с фотонным индексом 1.4–2.5 (см., например, Narayan et al., 1998; Ball et al., 2001).

Необходимы рентгеновские снимки высокого разрешения, глубокие оптические/ИК изображения и спектроскопические наблюдения, чтобы достоверно установить наличие или отсутствие связи источника XMM 0838+24 с хозяйской галактикой и таким образом определить его рентгеновскую светимость.

В данном исследовании мы не анализируем подробно рентгеновские спектры XMM 0838+24 и XMM 1226+12, потому что, учитывая их незначительные рентгеновские потоки и статистику фотонов, этот анализ не позволит нам отбросить гипотезы о каком-либо конкретном традиционном типе рентгеновских объектов. Однако мы сравнили их рентгеновские цвета из каталога источников XMM-Newton с известными AGN и ESO 243–49 HLX–1. На Рис. 4.6 на диаграммах жесткости мы приводим два “крайних” состояния ESO 243–49 HLX–1, цвета наших HLX-кандидатов в сравнении с популяцией AGN из работы Lin et al. (2012). Очевидно, что свойства ESO 243–49 HLX–1 в разных рентгеновских полосах не позволяют однозначно отличить его от AGN. В то же самое время отобранные кандидаты HLX расположены в стороне от ESO 243–49 HLX–1 и большинства AGN из-за систематически более жестких HR2 и HR3 цветов. Этот факт, однако, недостаточен для какой-либо конкретной интерпретации природы кандидатов.

4.1.4.2 Свойства базовой выборки

Вычислим объемную плотность кандидатов HLX из нашей базовой выборки. Из общего числа 98 HLX-кандидатов мы ожидаем по крайней мере 16 истинных HLX. Учитывая объем поиска и телесный угол, это дает нам плотность в один HLX на $\approx 2 \times 10^5$ Мпк³, что в несколько тысяч раз меньше частоты встречаемости ULX (Swartz et al., 2011). Мы можем отнормировать эту плотность на число гало галактик. В общей сложности есть 33 879 SDSS галактик, попадающих в область покрытия каталога 3XMM-DR5 (наблюдавшейся

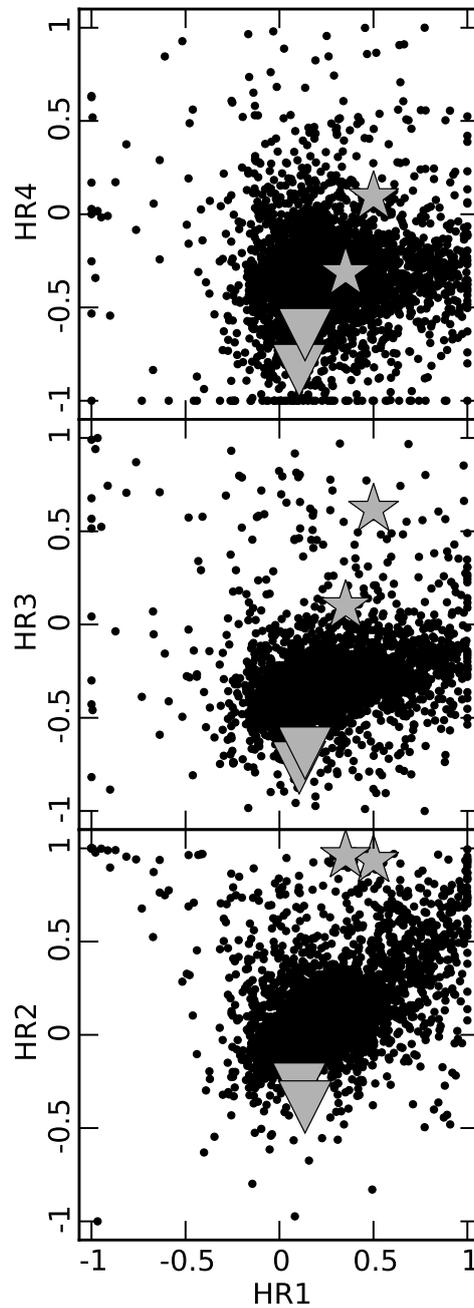


Рис. 4.6: Двухцветные рентгеновские диаграммы для известных AGN (из [Lin et al. \(2012\)](#), черные точки), HLX-кандидатов из настоящего раздела (серые звезды) и двух спектральных состояний ESO 243–49 HLX–1: с высокой светимостью и крутым степенным законом, и низкой светимостью с жестким степенным законом (серые треугольники). Рентгеновские цвета взяты из каталога 3XMM-DR5 и определяются как $HR_i = (f_{i+1} - f_i)/(f_i + f_{i+1})$, где f_i — это рентгеновский поток в i -ой полосе *XMM-Newton* (1-ая полоса соответствует 0.2–0.5 кэВ, 2-ая полоса — 0.5–1.0 кэВ, 3-я полоса — 1.0–2.0 кэВ, 4-я полоса — 2.0–4.5 кэВ, 5-я полоса — 4.5–12 кэВ). Как показано в работе [Lin et al. \(2012\)](#), систематические неопределенности этих цветов могут достигать 0.1, что меньше размеров символов, которыми обозначены HLX-кандидаты и ESO 243–49 HLX–1.

ХММ-Newton доли полного неба), которые мы включили в нашу процедуру внеядерного отождествления по координатам. Следовательно, плотность наших HLX-кандидатов составляет около 6×10^{-4} на галактику. Если они все являются аккрецирующими ИМВН, это слишком большая плотность для популяции “голых” ИМВН, захвативших звездных компаньонов, которая оценивается $\sim 10^{-7}$ на одну галактику (e.g. Kuranov et al., 2007). В то же время это не противоречит ожидаемой плотности ИМВН с барионным окружением, оставшихся после неэффективных слияний галактик — несколько $\times 10^{-2}$ на галактику (Volonteri & Perna, 2005). Такие легкие спутники галактик должны иметь высокие периферийные орбиты, которые почти не меняются со временем, что вполне согласуется с галактоцентрическими проекционными расстояниями, какие мы и видим у наших кандидатов (15 кпк в случае ХММ 0838+24 и 33 кпк для ХММ 1226+12). Отметим также, что, как и ULX низкой светимости, два представленных HLX-кандидата находятся в галактиках позднего морфологического типа, в отличие от ESO 243–49 HLX–1. Тем не менее, слишком рано говорить о свойствах окружения кандидатов в HLX до достоверного подтверждения их связи с предполагаемыми галактиками-хозяевами.

4.1.5 Выводы

В данном разделе мы представили метод поиска внеядерных рентгеновских источников в окрестностях галактик с известными расстояниями. Считая, что рассматриваемые объекты связаны с предполагаемыми хозяйскими галактиками, мы искали те из них, чья светимость попадает в диапазон, типичный для гипер-ярких рентгеновских объектов. Полученная базовая выборка из 98 рентгеновских источников имеет не более 71 ± 11 “мусорных” объектов, что подразумевает наличие среди кандидатов нескольких истинных HLX. Мы использовали многоволновые обзоры и архивы данных, доступные через сервисы Виртуальной Обсерватории, для построения распределений спектральной энергии кандидатов, чтобы исключить из выборки обычные рентгеновские объекты, такие как фоновые AGN, блазары, галактики со звездообразованием или рентгеновские объекты в нашей Галактике. В этом разделе мы привели подробную информацию о двух HLX-кандидатах из базовой выборки, которые удовлетворяют критериям $f_X/f_{\text{opt}} > 100$ или $f_X/f_{\text{NIR}} > 40$, и обсудили их возможную природу. Мы подчеркиваем, что требуются дальнейшие наблюдения этих объектов, чтобы подтвердить их HLX природу: более глубокие рентгеновские наблюдения с большим угловым разрешением, а также оптическое отождествление с последующей спектроскопией для подтверждения связи с предполагаемой хозяйской галактикой.

4.1.6 Подробности построения выборки

Чтобы результаты наших исследований можно было легко воспроизвести, мы приводим полные технические детали запросов, написанных на языке SQL, которые мы использовали для создания результирующей выборки кандидатов в HLX. Эти запросы выполнялись в спектроскопической базе данных SDSS DR12 в сервисе SDSS *CasJobs*¹⁰. Имена столбцов брались либо из каталога 3XMM-DR5, либо из каталога SDSS DR12.

После составления начального списка источников рентгеновского излучения (таблица `mydb..xmm`, 309 327 записей) мы сначала нашли для каждого их них ближайший спектральный объект SDSS в пределах $2'$ от рентгеновских координат, получив 82 710 совпа-

¹⁰<http://skyserver.sdss3.org/casjobs/>

дений:

```
SELECT
  *, dbo.fGetNearestSpecObjIDEq(SC_RA, SC_DEC, 2.0) AS specobjid
INTO
  mydb..xmm_match_specdr12
FROM
  mydb..xmm
WHERE dbo.fGetNearestSpecObjIDEq(SC_RA, SC_DEC, 2.0) IS NOT NULL
```

Затем мы использовали следующий запрос для выполнения внеядерного сопоставления по координатам (см. Рис. 4.1 с иллюстрацией метода) исходного списка рентгеновских объектов и выборки из таблицы спектральных объектов SDSS, полученной на предыдущем шаге, чтобы получить дополнительную фотометрическую информацию, рассчитать расстояния (отбрасывая объекты дальше 800 Мпк) и рентгеновскую светимость, одновременно оставляя лишь объекты со светимостями между 10^{41} и 10^{44} эрг с^{-1} , расположенными не ближе $3 * \text{sc_poserr}$ (но, по крайней мере, $5''$) от центра галактики, и не дальше, чем $3 * \text{sc_poserr} + 2 * \text{petroRad_r}$ угл. сек. (373 совпадения):

```
SELECT
  p.objid, p.ra AS sdss_ra, p.dec AS sdss_dec, p.petroRad_r,
  p.petroR50_r, p.petroR90_r, x.*,
  dbo.fDistanceEq(x.SC_RA, x.SC_DEC, p.ra, p.dec) * 60. AS separation,
  dbo.fCosmoDl(s.z,DEFAULT,DEFAULT,DEFAULT,DEFAULT,DEFAULT) AS distance,
  x.SC_EP_8_FLUX * 4 * 3.1415926 *
  power(dbo.fCosmoDl(s.z,DEFAULT,DEFAULT,DEFAULT,DEFAULT,DEFAULT) * 3.08e24, 2) AS
INTO
  mydb..xmm_match_specdr12_offnuclear
FROM
  photoObjAll AS p
JOIN
  specObjAll AS s ON s.bestobjid = p.objid
JOIN
  mydb..xmm_match_specdr12 AS x ON s.specobjid = x.specobjid
WHERE
  dbo.fDistanceEq(x.SC_RA, x.SC_DEC, p.ra, p.dec) * 60. > 3 * x.SC_POSERR
AND dbo.fDistanceEq(x.SC_RA, x.SC_DEC, p.ra, p.dec) * 60. > 5.
AND dbo.fDistanceEq(x.SC_RA, x.SC_DEC, p.ra, p.dec) * 60. < 3 * SC_POSERR + 2 * p.p
AND s.z > 0
AND x.SC_EP_8_FLUX * 4 * 3.1415926 *
  power(dbo.fCosmoDl(s.z,DEFAULT,DEFAULT,DEFAULT,DEFAULT,DEFAULT) * 3.08e24, 2) > 1
AND x.SC_EP_8_FLUX * 4 * 3.1415926 *
  power(dbo.fCosmoDl(s.z,DEFAULT,DEFAULT,DEFAULT,DEFAULT,DEFAULT) * 3.08e24, 2) < 1
AND dbo.fCosmoDl(s.z,DEFAULT,DEFAULT,DEFAULT,DEFAULT,DEFAULT) < 800
```

Добавление дополнительного ограничения на рентгеновский поток $\text{SC_EP_8_FLUX} > 5e-14$ для этого запроса дает нашу базовую выборку из 98 кандидатов HLX.

В качестве последнего шага мы выбираем объекты с высоким отношением рентгеновского потока к оптическому. То есть мы отбрасываем те источники, которые имеют оптических двойников в SDSS DR12 в пределах $3 * sc_poserr$:

```
SELECT
*
INTO
mydb..xmm_match_specdr12_offnuclear_fxfopt
FROM
mydb..xmm_match_specdr12_offnuclear
WHERE
SRCID NOT IN (
SELECT
x.SRCID
FROM
mydb..xmm_match_specdr12_offnuclear AS x, photoPrimary AS p
WHERE
p.objid = dbo.fGetNearestObjIDEq(x.SC_RA, x.SC_DEC, 3 * SC_POSERR / 60.)
AND p.objid <> x.objid
)
```

Это приводит к исключению 61 объекта — таким образом, остается только 37 “оптически тихих” источников для дальнейшего более детального исследования.

4.2 Самый медленный пульсар в шаровом скоплении

Результаты, представленные в данном разделе, опубликованы в работе Zolotukhin et al. (2016a).

Считается, что нейтронные звезды рождаются быстровращающимися, а затем проходят фазу радиопульсаций, расходуя на излучение кинетическую энергию вращения и замедляясь до периодов 1–10 с. Наличие множества миллисекундных пульсаров в нашей Галактике объясняется концепцией *раскрутки*: в течение эпохи аккреции со звезды-донора в двойной системе нейтронная звезда ускоряется до миллисекундных периодов. Однако наблюдается всего несколько пульсаров на стадии раскрутки, все с уже достаточно высокой частотой вращения. В настоящем разделе мы описываем обнаружение рентгеновского пульсара с $P_{\text{spin}} = 1.20$ с в шаровом скоплении B091D в галактике Андромеды (см. Рис. 4.7), самого медленного когда-либо найденного в шаровом скоплении. Этот яркий (до 30% эддингтоновской светимости) раскручивающийся пульсар, наблюдающийся в течение более 12 лет, начал аккрецировать вещество менее 1 млн. лет назад и еще не имел достаточно времени, чтобы ускориться до сотен Гц. Нейтронная звезда в этой уникальной широкой двойной системе с орбитальным периодом $P_{\text{orb}} = 30.5$ ч находится в богатом тяжелыми элементами скоплении возрастом 12 млрд. лет и аккрецирует вещество маломассивного немного проэволюционировавшего после главной последовательности компаньона. Мы считаем, что наблюдаем двойную систему, сформировавшуюся относительно недавно путем захвата звезды с массой $\sim 0.8M_{\odot}$ при динамическом взаимодействии, которое представляет собой вполне реалистичный сценарий в таком массивном и плотном шаровом скоплении,

как B091D, где высоки глобальный и удельный темпы тесных сближений звезд. Таким образом, этот интенсивно аккрецирующий еще нераскрученный рентгеновский пульсар является долгожданным недостающим звеном в стандартной теории раскрутки пульсаров.

Настоящая вторая часть последней главы устроена следующим образом: Раздел 4.2.1 кратко описывает “фабрику пульсаров” *XMM-Newton* — оригинальное программное обеспечение, с помощью которого в автоматическом режиме в базе данных всех фотонов *XMM-Newton* (см. описание ее создания в Разделе 1.2.4) было обнаружено пульсирующее излучение; Раздел 4.2.2 описывает ручной “слепой” поиск пульсирующего излучения во всех доступных для этого источника данных *XMM-Newton*, и определение параметров орбиты источника; Разделы 4.2.3 и 4.2.4 резюмируют наши оценки временных и спектральных характеристик данного источника, которые затем обсуждаются в Разделе 4.2.5, где мы обсуждаем возможное происхождение и эволюцию системы.

4.2.1 Метод поиска пульсаций: “фабрика пульсаров”

Фотонная база данных *XMM-Newton*, создание которое описывается в Разделе 1.2.4, обеспечивает удобное извлечение калиброванных и приведенных к барицентру списков событий для произвольного набора астрофизических объектов, наблюдавшихся камерой EPIC/rp на борту спутника *XMM-Newton*. Мы разработали программное обеспечение (ПО), именуемое для простоты “фабрика пульсаров”, для поиска когерентных пульсаций в фотонной базе данных, оптимизированное под большую производительность.

“Фабрика пульсаров” состоит из нескольких уровней анализа. Во-первых, для каждого списка событий она выдает спектральную плотность мощности (power density spectrum, PDS), адаптируя временной биннинг так, чтобы частота Найквиста была существенно больше 2 кГц, а суммарное число временных окон в каждом интервале хорошего времени наблюдения раскладывалось на небольшие простые числа для лучшей производительности алгоритма быстрого преобразования Фурье (fast Fourier transform, FFT) в программной библиотеке NUMPY для языка программирования PYTHON. Алгоритм ищет в спектральной плотности мощности пики превышающие уровень значимости 99%, включая поправку на количество пробных попыток согласно стандартным правилам из Leahy et al. (1983). Если такие пики найдены, ПО запускает тест Z_n^2 (Buccheri et al., 1983) в окрестности их частот. Если пик из PDS подтвержден тестом Z_n^2 , запускается поиск когерентного сигнала с производной по частоте программой PRESTO (Ransom, 2001), чтобы получить более существенные ограничения или исключить это возможное значение частоты пульсаций. Последним шагом автоматической процедуры является проверка полученной частоты в других наблюдениях данного источника из каталога 3XMM-DR5. Если обнаружение частоты высоко достоверно ($> n\sigma$, где n может меняться от запуска к запуску), или если одна и та же частота найдена в разных наблюдениях, оператор получает уведомление и начинается ручное исследование обнаруженного сигнала.

Сначала мы тестировали алгоритм “фабрики пульсаров” используя данные *XMM-Newton* по набору известных ярких рентгеновских магнетаров из McGill Online Magnetar Catalog¹¹ (Olausen & Kaspi, 2014). После достижения устойчивого восстановления известных периодов когерентных пульсаций магнетаров, мы запустили более широкий поиск на

¹¹<http://www.physics.mcgill.ca/~pulsar/magnetar/main.html>

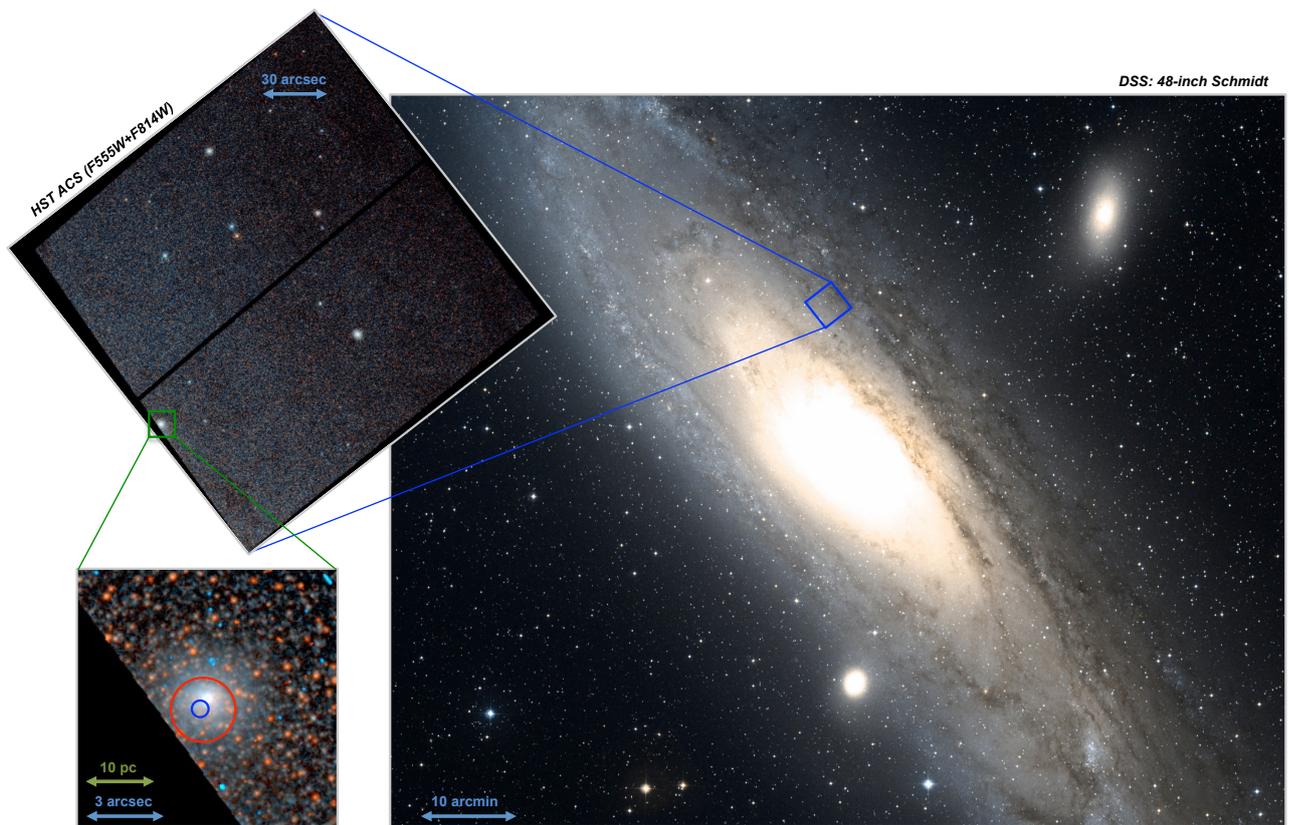


Рис. 4.7: Расположение пульсара XB091D и содержащего его шарового скопления B091D в галактике Андромеды в разных масштабах. Используются цветные изображения из Digitized Sky Survey и *HST* ACS. На увеличенной вставке в нижнем левом углу изображен 95% уровень значимости неопределенности рентгеновского положения из каталогов *Chandra* (красная окружность) и *XMM-Newton* (синяя окружность).

Параметр	Значение
P_{orb}	1.27101304(16) d
T_{asc}	MJD 56104.791(26)
$a \sin i/c$	2.89(13) св. секунды
e	<0.003

Таблица 4.5: Наилучшее орбитальное решение, найденное в этой главе. Скобки обозначают 1σ ошибки, полученные с помощью TEMPO2. Верхний предел эксцентриситета — это максимальная его ошибка, полученная из модели ELL1 для значений эксцентриситета, согласующихся с 0.

неизученной выборке рентгеновских источников из каталога 3XMM-DR5. Очевидным выбором области поиска пульсаций стала галактика M31, так как в ней известно множество рентгеновских источников, наблюдавшихся неоднократно, и кроме того в Виртуальной Обсерватории для нее имеются значительные массивы данных, если понадобятся дополнительные исследования.

4.2.2 Обнаружение пульсаций и орбитальные параметры двойной системы

В результате тестового запуска на выборке объектов из M31 автоматический алгоритм “фабрики пульсаров” обнаружил пульсации приблизительно одинаковой частоты в 3 наблюдениях (ObsID: 0112570101, 0505720301, P0650560301) у источника 3XMM J004301.4+413017¹². Тест Z_n^2 , сработавший после обнаружения пика в PDS, подтвердил частоту-кандидата. Заметим, что обнаружение этой пульсации возможно полностью воспроизвести в сети Интернет на странице извлечения фотонов от данного источника, например для наблюдения ObsID 0112570101: <http://xmm-catalog.irap.omp.eu/pievli/101125701010068>.

Мы запустили поиск пульсаций с производной частоты программой PRESTO во всех остальных наблюдениях, содержащих фотоны источника. Высокие значения производной периода, явное увеличение значимости обнаружения при добавлении в поиск оптимального решения второй производной, и форма фазовой кривой, полученные PRESTO, указывали на наличие орбитальной модуляции. Во основном следуя процедуре, описанной в [Bachetti et al. \(2014\)](#), мы разрезали два самых длинных наблюдения на куски продолжительностью 10–30 кс и запустили специальный алгоритм поиска решения в плоскости $\nu - \dot{\nu}$ (где ν — частота пульсаций), дающий наилучшую статистику Z_2^2 .

Внутри длинных наблюдений (ObsID 0112570101, ObsID 0690600401) частота наилучшего решения и ее производная явно следовали синусоидальной зависимости с периодом между 1 и 2 днями, как и ожидалось бы при орбитальной модуляции. Из наилучшей аппроксимации данных наблюдения ObsID 0690600401 мы определили одновременно значения частоты и ее производной внутри ожидаемого диапазона изменения в связи с орбитальным движением, и получили первое приближение орбитальных параметров ($P_{\text{orb}} \sim 1.2$ дня, $a \sin i/c \sim 2.60$ св. секунды, $T_{\text{asc}} \approx \text{MJD}56104.789$, где $a \sin i/c$ — проекция большой полуоси орбиты двойной системы на луч зрения, а T_{asc} — эпоха прохождения восходящего узла). Начиная с первого грубого приближения этих параметров, путем проб и ошибок, мы пытались выровнять пульсы на фазовой диаграмме сначала в небольших частях наблюдения,

¹²См. страницу на веб-сайте каталога 3XMM-DR5:<http://xmm-catalog.irap.omp.eu/source/201125706010086>

ObsID	Начало наблюдения UTC	Экспозиция (с)	P_{spin} (с)	$S / \text{d.o.f.}$	Глубина пульса
0112570101	2002-01-06 18:45:45	64317	1.203898(49)	8.7	0.33 ± 0.07
0405320701	2006-12-31 14:24:50	15918	1.203731(11)	4.1	0.28 ± 0.08
0405320901	2007-02-05 03:44:24	16914			
0505720201	2007-12-29 13:42:13	27541	1.203738(10)	7.3	0.20 ± 0.05
0505720301	2008-01-08 07:01:05	27219			
0505720401	2008-01-18 15:11:47	22817			
0505720501	2008-01-27 22:28:21	21818			
0551690201	2008-12-30 03:27:52	21916	1.203662(8)	5.0	0.23 ± 0.05
0551690301	2009-01-09 06:19:54	21918			
0551690501	2009-01-27 07:23:03	21912			
0551690601	2009-02-04 13:21:03	26917			
0600660201	2009-12-28 12:42:54	18820	1.203675(13)	4.2	0.25 ± 0.08
0600660501	2010-01-25 02:39:14	19715			
0650560301	2011-01-04 18:10:16	33415	1.203651(8)	9.1	0.31 ± 0.06
0650560401	2011-01-15 00:16:57	24316			
0650560601	2011-02-03 23:58:12	23918			
0674210201	2011-12-28 01:07:36	19034	1.203634(13)	4.9	0.35 ± 0.09
0674210301	2012-01-07 02:47:01	15433			
0674210401	2012-01-15 15:00:38	19916			
0674210501	2012-01-21 12:22:03	17317			
0690600401	2012-06-26 06:29:43	122355	1.203698(4)	20.6	0.23 ± 0.03
0700380501	2012-07-28 15:16:27	11914			
0700380601	2012-08-08 23:08:08	23916			
0701981201	2013-02-08 22:19:55	23918	1.20373(13)	7.0	0.45 ± 0.14

Таблица 4.6: Наблюдения *XMM-Newton*, использованные в настоящей работе для временного анализа, и его основные результаты. Доступные наблюдения были разбиты на 9 групп, которые анализировались в предположении, что период вращения нейтронной звезды P_{spin} внутри блока наблюдений меняется незначительно. $S / \text{d.o.f.}$ — это статистическая значимость полученного решения, как определено в Разделе 4.2.7.1. Глубина пульса (также мы употребляем термин пульсирующая доля излучения) определена там же как величина A . Ошибки представлены в виде уровня значимости 1σ .

затем вычисляя времена прихода фотонов (ТОВА) с помощью специальной реализации метода `fftfits` (Taylor, 1992) и используя TEMPO2 для аппроксимации орбитального решения с помощью модели ELL1¹³. В итоге мы достигли решения, достаточно хорошо описывающего наблюдение ObsID 0690600401. Затем мы применили полученное решение к другим длинным наблюдениям, уточняя параметры орбиты таким образом, чтобы каждая остаточная орбитальная модуляция была учтена в модели. При этом мы предполагали постоянную частоту пульсаций на протяжении наблюдения. Решение, полученное таким путем, выглядит следующим образом: $P_{\text{orb}} \approx 1.2695$ дня, $a \sin i/c \approx 2.886$, $T_{\text{asc}} \approx 56104.7907$. После этого мы рассматривали остальные наблюдения между этими двумя длинными наблюдениями, упомянутыми выше, используя дискретные величины орбитального периода так, чтобы сохранялось время прохождения восходящего узла близким к таковому в двух длинных наблюдениях. Для каждого значения периода мы вычисляли разброс ТОВА и выбрали значение, связанное с наименьшим рассеянием. Эксцентриситет в модели ELL1 всегда согласовывался с 0 на уровне значимости $\sim 2\sigma$, с ошибками порядка 0.002–0.003. Мы будем использовать это значение в качестве верхнего предела эксцентриситета. Полное орбитальное решение представлено в Таблице 4.5.

Мы использовали его для нахождения пульсаций в оставшихся наблюдениях и уточнения оценки по специальному алгоритму, описываемому в следующем разделе.

4.2.3 Детальный анализ временных рядов

Исключая несколько случаев (длинные наблюдения ObsID: 0112570101, 0650560301, 0690600401), все остальные индивидуальные наблюдения имеют плохую фотонную статистику для определения периода и формы пульсов с достаточной для детальной интерпретации статистической значимостью.

Мы предприняли попытку поиска когерентных пульсаций путем объединения нескольких наблюдений в группы, охватывающие интервал от 2 до 5 месяцев в разные годы, предполагая, что период пульсаций не менялся в течение индивидуальных наблюдений в каждой группе. Сначала мы скорректировали все времена прихода фотонов, используя элементы орбиты двойной системы, приведенные выше. Затем мы использовали сетку периодов с регуляризованной S статистикой (детали см. в Разделе 4.2.7), оставив орбитальную фазу в качестве свободного параметра.

Для каждого года мы начинали с данных, обычно полученных в конце декабря или начале января, и затем постепенно добавляли наблюдения, проверяя, что S статистика растет вблизи ожидаемого периода, так как при увеличении экспозиции из-за добавления данных это означает, что пульсации все еще когерентны. Если S статистика (Leahy et al., 1983) не увеличивалась или уменьшалась при добавлении еще одного наблюдения, мы считали, что период пульсаций значительно изменился и начинали новый блок. Результаты нашего временного анализа приведены в таблице 4.6, блоки наблюдений, использованные для поиска когерентности разделены горизонтальными линиями. Мы оценили погрешности измерений периода аналитически из фотонной статистики, времени экспозиции и параметров пульсации как показано в Разделе 4.2.7. На Рис. 4.8 приведены 9 восстановленных профилей пульсаций между 2002 и 2012 годом.

Заметим, что при коррекции времен прибытия фотонов с использованием орбитального

¹³Эта модель уместна для квазикруговых орбит, подробнее см. http://www.atnf.csiro.au/people/pulsar/tempo/ref_sections/binary.txt

решения [Esposito et al. \(2016\)](#), нам удалось получить достаточную значимость пульсаций лишь в трех наблюдениях (0112570101, 0650560301, 0690600401), в то время как в остальных наборах данных сигнал пульсаций не детектировался, так как был смазан. В то же время орбитальное решение полученное в этом исследовании позволяет достоверно обнаружить пульсации во всех наблюдениях, приведенных в таблице 4.6. Хотя оба орбитальных решения согласуются друг с другом по порядку величины, представленное в нашей работе решение является более точным.

Анализ комбинированных наборов данных обнаруживает тенденцию к ускорению вращения XB091D, которую невозможно обнаружить в результатах анализа индивидуальных наблюдений, см. Рис. 4.9. Несмотря на минимум одну возможную смену знака \dot{P} (например, увеличение периода в предпоследнем наборе данных, включающем наблюдения с июня по август 2012), наиболее вероятно, что нейтронная звезда ускоряет свое вращение. В среднем темп ускорения составляет $\dot{P} \approx -5.7 \times 10^{-13} \text{ с}^{-1}$ если рассматривать все 9 оценок периода, или $\dot{P} \approx -7.1 \times 10^{-13} \text{ с}^{-1}$ если исключить последний набор данных с наибольшей неопределенностью оценки периода.

4.2.4 Спектральный анализ

Мы проанализировали все наблюдения, в которых XB091D попал в поле зрения инструмента EPIC. Обработка данных была проведена стандартными процедурами `epproc` и `emproc` из программного пакета *XMM-Newton*SAS (Science Analysis Software) версии 14 с использованием актуальных калибровочных файлов. Из сырых списков событий мы выбрали фотоны высокой энергии (> 10 кэВ для pn и от 10 до 12 кэВ для MOS) и построили для них кривые блеска с группировкой по 50 с для того, чтобы отфильтровать интервалы плохого времени, не пригодные для дальнейшего анализа из-за высокого фона частиц. Пороговые потоки для фильтрации были выбраны на уровне 0.4 ^{-1} и 0.35 ^{-1} для pn и MOS, соответственно. Затем мы использовали интерактивную процедуру `xmmselect` из пакета SAS для извлечения спектров источника и фона из обработанных списков событий, начиная с ObsID 0690600401, который имеет наибольшую статистику по отсчетам.

В этом наблюдении источник лежит в поле зрения всех трех камер EPIC. Мы извлекли отсчеты источника в круге радиусом $25''$, в то время как для фона мы выбрали события из соседней области, свободной от источников в пределах того же чипа детектора ПЗС. Для того, чтобы получить спектр наилучшего качества, мы применили фильтр `(FLAG==0)&&(PATTERN==0)` при выборе событий на детекторе pn. Для отсчетов на детекторах MOS мы использовали стандартные флаги фильтрации, `(#XMMEA_EM)&&(PATTERN<=12)`. Извлеченные спектры были затем перегруппированы, чтобы иметь по меньшей мере 40 и 25 отсчетов на элемент разрешения по энергии для pn и MOS, соответственно.

Аппроксимация спектра проводилась с помощью пакета XSPEC версии 12.9 ([Arnaud, 1996](#)). Спектр XB091D может быть описан степенным законом с поглощением и экспоненциальным обрывом, `WABS (cflux * cutoffpl)` в терминах моделей XSPEC. Спектр жесткий, с фотонным индексом $\Gamma = 0.20 \pm 0.5$, энергией обрыва $E_{\text{cut}} = 4.6 \pm 0.4$ кэВ, и низким поглощением, $n_H = 3.79 \times 10^{20} \text{ см}^{-2}$, полученном из спектра pn. Мы зафиксировали это значение при одновременном фите pn+MOS. Эта наиболее подходящая плотность атомов на луче зрения в целом согласуется с ожидаемым значением из [Dickey & Lockman \(1990\)](#) в направлении на M31. Нормированный χ^2 аппроксимации равен 1.16 для 310 степеней сво-

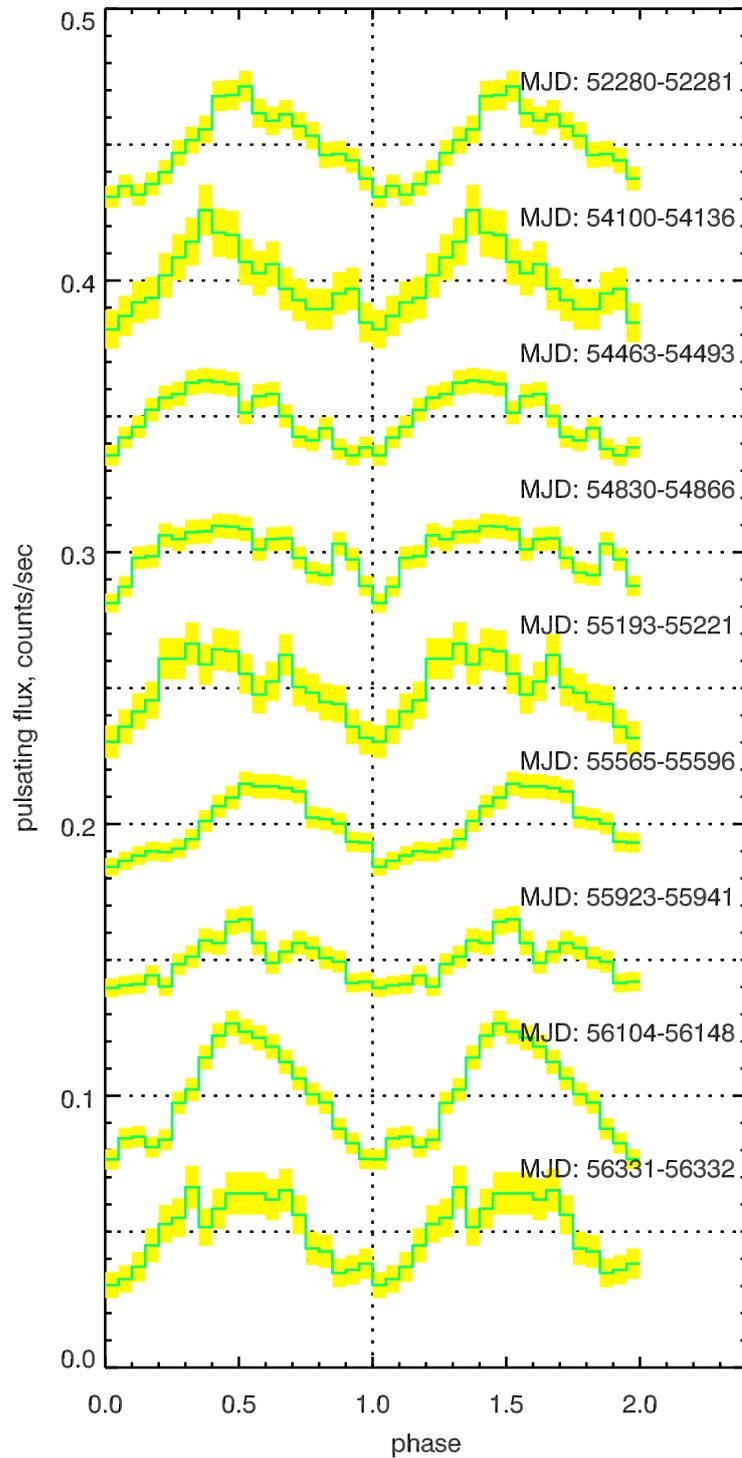


Рис. 4.8: Восстановленные профили пульсаций XRB091D, полученные после поиска когерентных пульсаций с использованием регуляризованной S статистики в 9 комбинированных наборах данных, перечисленных в таблице 4.6. Сдвиг по оси Y произволен и сделан для наглядности.

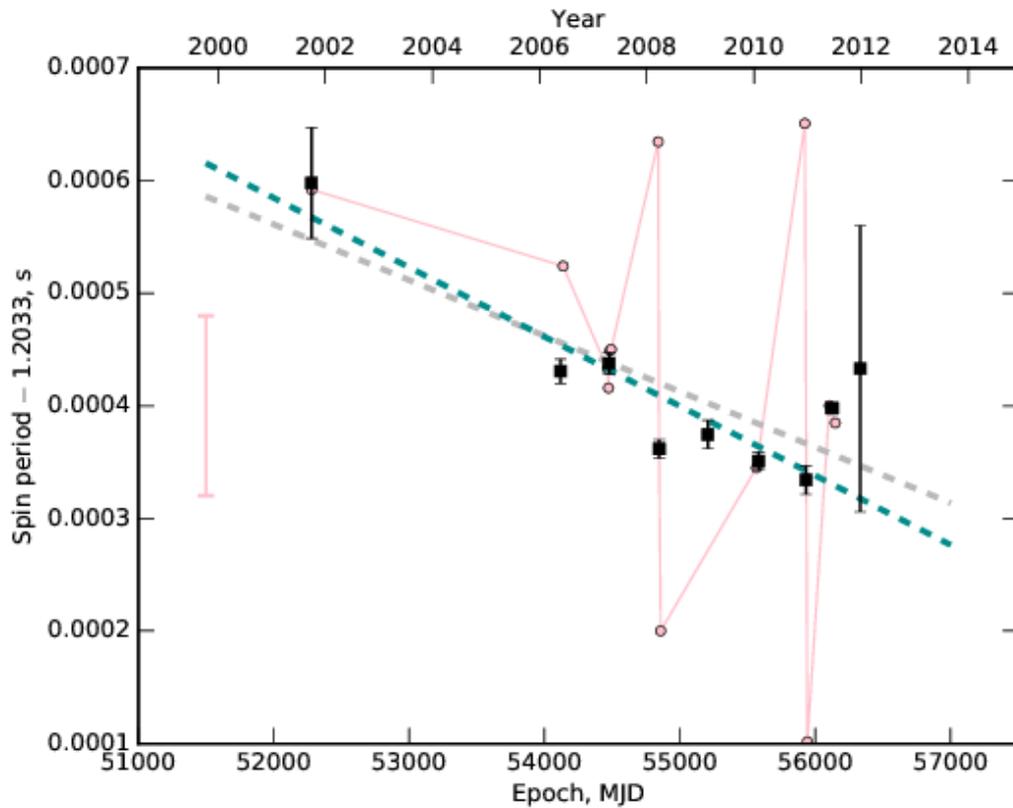


Рис. 4.9: Эволюция периода вращения нейтронной звезды. Оценки периода вращения, полученные из индивидуальных наблюдений показаны светлым. Они сильно меняются, типичная погрешность индивидуального измерения (показана отдельно слева) велика из-за плохой статистики фотонов. Эффект, который может быть воспринят как частое изменение \dot{P} , в реальности является следствием значительной неопределенности этих оценок. По этой причине мы используем сгруппированные наборы данных, перечисленные в таблице 4.6, для оценки периода с лучшей статистикой. Эти оценки показаны черными точками. Их погрешности вычислены, как описано в Разделе 4.2.7.1, и иллюстрируют лучшее качество анализа комбинированных данных. Заметим, что в некоторых случаях оценки периода вращения недоступны из единичных наблюдений, однако группировка наблюдений с соседними во времени зачастую улучшает статистику пульсаций. Серая пунктирная линия — это линейная аппроксимация оценок периодов из комбинированных данных. Голубая пунктирная линия — то же самое, но без учета последней оценки периода с большой неопределенностью.

боды. Мы представляем график наилучшей аппроксимации суммарного спектра со всех детекторов и модели для наблюдения ObsID 0690600401 на Рис. 4.10.

Затем мы проанализировали все другие наблюдения, отбрасывая те из них, где область извлечения фотонов источника перекрывалась с зазорами детектора ПЗС или столбцами неисправных пикселей, и применяя менее строгие параметры фильтрации событий, (`FLAG==0`)&&(PATTERN<=4). В любом случае, учитывая более низкую статистику отсчетов, для всех наблюдений, кроме ObsID 0700380601 более простой степенной модели с абсорбцией WABS (`cflux * powerlaw`) достаточно, чтобы адекватно аппроксимировать спектры. Мы использовали мультипликативный компонент `cflux`, который возвращает поток от источника непосредственно как параметр аппроксимации, чтобы исследовать переменность светимости до поглощения в полосе 0.3–10 кэВ, и жесткость спектра (hardness ratio, HR), где $HR = Flux_{5-10} / Flux_{0.3-5}$, принимая расстояние до M31 равным 752 кпк и полагая излучение изотропным (Рис. 4.11). Мы нашли, что форма спектра связана со светимостью источника, а именно при более высокой светимости наблюдается более жесткий спектр, см. Рис. 4.12.

Trudolyubov & Priedhorsky (2004) моделируют спектр этого рентгеновского источника жестким степенным законом. Shaw Greening et al. (2009) аналогично приводят оценку его фотонного индекса 0.9 ± 0.1 и интерпретируют природу источника как массивную рентгеновскую двойную (НМХВ). Esposito et al. (2016) подчеркивают, что для некоторых наблюдений степенная модель с поглощением не дает удовлетворительных результатов, и пытаются применить модель черное тело + степенная функция. Также, как и для степенного закона с обрывом, найденные ими параметры (фотонный индекс и поглощение) согласуются с нашими результатами в пределах погрешностей. Они также отмечают похожую корреляцию “жестче – ярче” между светимостью источника и жесткостью его спектра.

4.2.5 Обсуждение

Сначала мы оценим вероятность случайной проекции этого рентгеновского источника на шаровое скопление B091D, то есть отсутствия физической связи с ним. Например, в работе Esposito et al. (2016) авторы предпочитают интерпретацию пульсара, не связанного с шаровым скоплением. Ассоциация рентгеновского источника и шарового скопления была впервые предложена в работе Supper et al. (2001) на основе данных *ROSAT* и подтвердилась Trudolyubov & Priedhorsky (2004), когда появились первые данные *XMM-Newton* и *Chandra* с более высоким угловым разрешением. В этих работах, однако, не дается оценка вероятности случайной ассоциации.

Объект XB091D включен в каталог 3XMM-DR5 с координатами R.A.=00:43:01.478, Dec.=+41:30:16.94 (J2000) и неопределенностью на уровне 1σ равной $0.13''$. Эти координаты вычисляются как среднее взвешенное координат всех индивидуальных регистраций объекта, в большинстве из которых объект находился на значительных углах от центра поля зрения. Координаты из наблюдения ObsID 0690600401 с наименьшим угловым расстоянием от оптической оси таковы: R.A.=00:43:01.440, Dec.=+41:30:17.30 (J2000), что находится на расстоянии $0.56''$ от средних координат при погрешности 1σ равной $0.19''$.

Каталог источников *Chandra* версии 1.1 (Evans et al., 2010) включает этот источник под наименованием CXO J004301.4+413016 с координатами R.A.=00:43:01.469, Dec.=+41:30:16.80 (J2000) и большой полуосью эллипса области 95% достоверности равной $1.19''$. Болонский каталог определяет координаты центра B091D как R.A.=00:43:01.446,

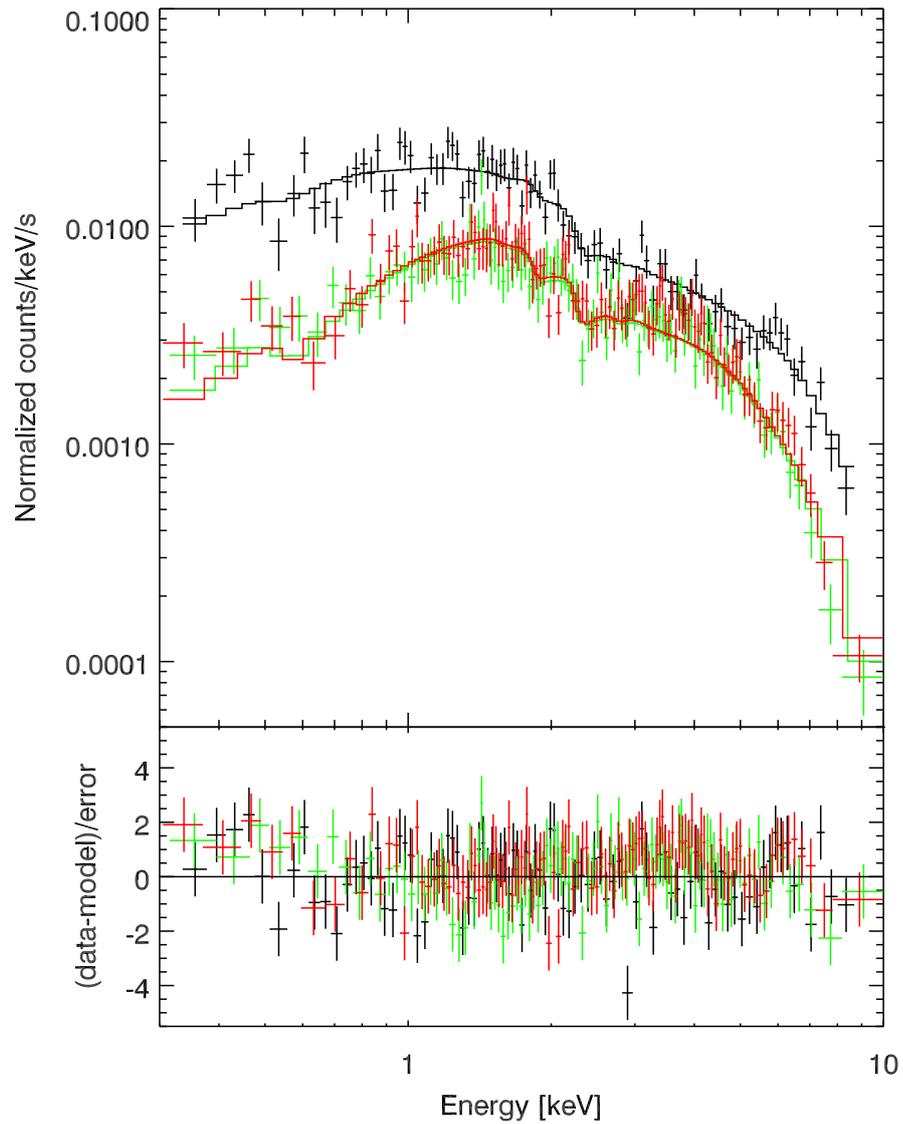


Рис. 4.10: Рентгеновский спектр XB091D и его наилучшая модель во время наблюдения ObsID 0690600401. Данные *pn* обозначены черным цветом, MOS1 — зеленым и MOS2 — красным. См. детали в основном тексте.

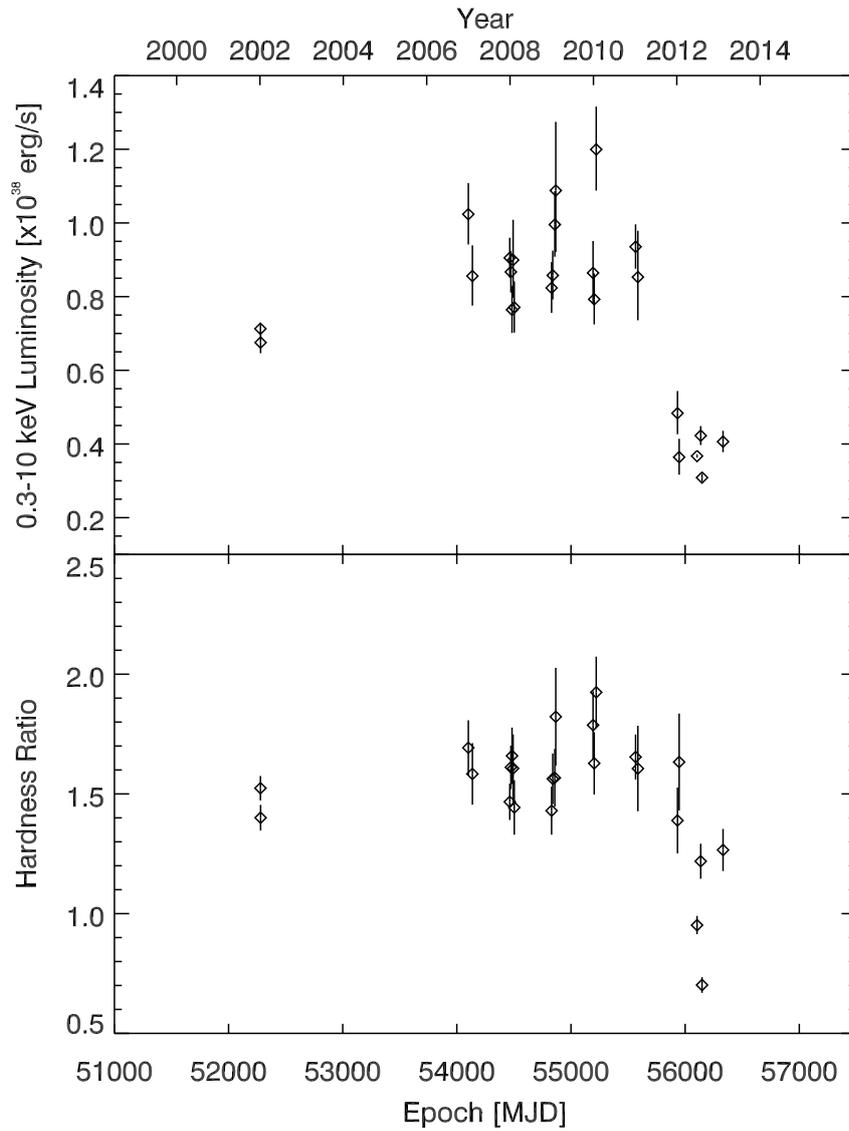


Рис. 4.11: (◊) Непоглощенная светимость XB091D в полосе 0.3–10 кэВ в единицах 10^{38} эрг с^{-1} от эпохи наблюдения. (◊) Отношение непоглощенных потоков в полосах 5–10 кэВ и 0.3–5 кэВ, соответственно. Погрешности соответствуют уровню значимости 1σ .

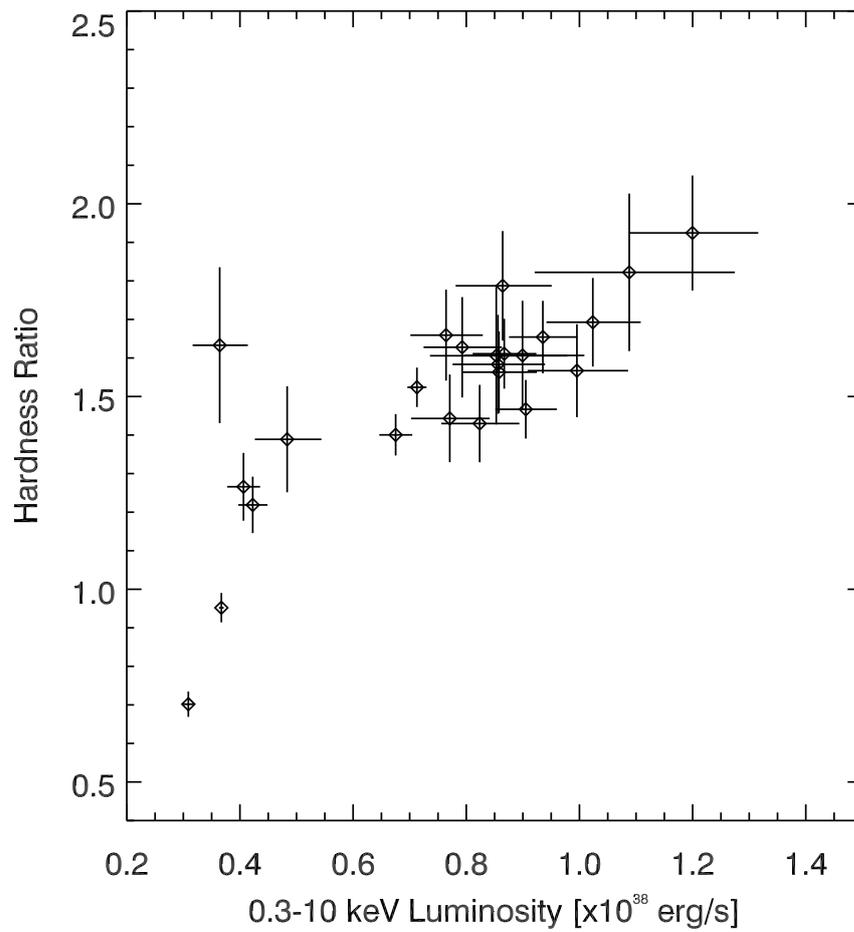


Рис. 4.12: Зависимость жесткости спектра XB091D от его непоглощенной светимости в полосе 0.3–10 кэВ. Погрешности соответствуют уровню значимости 1σ .

Dec=+41:30:17.15 (J2000), что согласуется с нашим определением центра скопления по изображению *HST* в пределах астрометрической погрешности $0.15''$ (см. Рис. 4.7). Расстояние до центра скопления и координаты рентгеновского источника равны, соответственно, $0.41''$ для усредненной позиции по каталогу *XMM-Newton*, $0.17''$ для наблюдения ObsID 0690600401, и $0.44''$ для позиции по каталогу *Chandra*. В наших вычислениях вероятности связи источника со скоплением мы для простоты предполагаем, что источник находится в пределах $1''$ от центра скопления.

В Болонском каталоге содержится 38 шаровых скоплений (включая кандидатов) на проекционных расстояниях от 14 до $16'$ от центра M31, что дает их плотность равной 6.0×10^{-5} шаровых скоплений на квадратную секунду дуги на таком угловом расстоянии от центра галактики. Это дает низкую вероятность (1.2×10^{-2}) наличия шарового скопления в пределах $1''$ от одного из 70 самых ярких рентгеновских источников в M31 из каталога 3XMM-DR5. На самом деле, только 4 из 70 самых ярких рентгеновских источников M31 лежат в этом кольце. Таким образом, их плотность 6.3×10^{-6} на квадратную угловую секунду переводится в равную всего 7.5×10^{-4} вероятность наличия яркого рентгеновского источника в пределах $1''$ от любого из шаровых скоплений. Поэтому весьма вероятно, что этот рентгеновский источник принадлежит шаровому скоплению B091D. Учитывая низкую вероятность случайной проекции, ниже мы предполагаем, что источник принадлежит к шаровому скоплению, не обсуждая альтернативные интерпретации.

Обнаружение пульсаций на частоте $\simeq 0.83$ Гц означает надежную классификацию источника как вращающейся нейтронной звезды. Это первый объект такого класса, найденный в галактике Андромеды, и один из самых отдаленных пульсаров, наблюдаемых на сегодняшний день. Кроме того, учитывая, что нейтронная звезда в XB091D находится внутри шарового скопления, она вращается медленнее, чем любая другая известная нейтронная звезда в шаровом скоплении, и примерно в десять раз медленнее, чем самый медленный из известных ранее аккрецирующий пульсар IGR J17480–2466 в шаровом скоплении Terzan 5 из известных ранее, имеющих частоту ~ 11 Гц (Papitto et al., 2011). Орбитальный период XB091D, составляющий 30.5 ч, также является самым длинным из известных для аккрецирующих двойных систем в шаровых скоплениях (см. таблицу 5 в Bahramian et al., 2014).

Учитывая максимальную наблюдаемую светимость системы в рентгеновском диапазоне $L_X = 1.2 \times 10^{38}$ эрг s^{-1} (см. Рис. 4.11), которая близка к эддингтоновской, можно определить соответствующий темп аккреции при условии, что болометрическая светимость не сильно превышает рентгеновскую: $\dot{M} = \frac{L_X R_{NS}}{GM_{NS}} = 1.0 \times 10^{-8} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$. Отметим, что наблюдаемая переменность в рентгеновском диапазоне с фактором $\simeq 3-4$ (см. Рис. 4.11) исключает значительный вклад других неразрешенных рентгеновских источников, находящихся в том же самом шаровом скоплении. Мы не можем полностью исключить возможность того, что в данном случае мы наблюдаем 2 наложенных друг на друга источника рентгеновского излучения, находящихся в одном и том же шаровом скоплении, хотя вероятность такого совпадения относительно низка: в нашей Галактике известно только одно шаровое скопление, содержащее сразу две LMXB — это M15 (Bahramian et al., 2014). В случае суперпозиции мы можем отнести к исходящей от данного рентгеновского источника только пульсирующую часть потока (порядка 20%, см. Таблицу 4.6). Это внесет в наши расчеты темпа аккреции и магнитного поля ниже лишь малую поправку и не затронет основные выводы.

Для нейтронной звезды, вращающейся с периодом 1.2 с, радиус коротации $R_C = (GMP^2/4\pi^2)^{1/3} \simeq 1890M_{1.4}^{1/3}$ км, где $M_{1.4}$ — масса нейтронной звезды в единицах $1.4 M_\odot$.

Мы используем такой же подход, как и в [Papitto et al. \(2011\)](#), чтобы оценить нижний и верхний пределы магнитного поля нейтронной звезды при условии, что она аккрецирует вещество донора с постоянным темпом. Разумно предположить, что в этом случае аккреционный диск обрывается на радиусе R_{in} , промежуточном между радиусом нейтронной звезды R_{NS} и радиусом коротации R_C : $R_{NS} < R_{in} \lesssim R_C = 1890M_{1.4}^{1/3}$. Внутренний радиус диска может быть приближенно определен (e.g. [Ghosh & Lamb, 1978](#)) из баланса между кинетической энергией падающего газа и магнитной энергией в магнитосфере нейтронной звезды: $R_{in} \simeq 160M_{1.4}^{1/7} R_6^{-2/7} L_{37}^{-2/7} \mu_{28}^{4/7}$, где R_6 — радиус нейтронной звезды в единицах 10 км, L_{37} — аккреционная светимость в единицах 10^{37} эрг s^{-1} и μ_{28} — магнитный дипольный момент нейтронной звезды в единицах 10^{28} Гс cm^3 . После тривиальных преобразований получим: $0.008L_{37\max}^{1/2} < \mu_{28} \lesssim 75L_{37\min}^{1/2}$. Подставим минимум ($L_{37\min} = 3.5$) и максимум ($L_{37\max} = 12.0$) наблюдаемой рентгеновской светимости в конечное выражение и получим: $2.7 \times 10^8 < B \lesssim 1.4 \times 10^{12}$. Верхний предел соответствует случаю равновесного вращения нейтронной звезды, когда аккреционный диск обрывается на радиусе коротации и падающее вещество не передает углового момента нейтронной звезде. Если система находится в равновесии, знак производной периода вращения нейтронной звезды \dot{P} будет меняться, а ее величина колебаться на небольших типичных значениях. Это то, что наблюдается, если анализировать наблюдения XB091D по отдельности (см. Рис. 4.9, светло-серая ломанная линия). Однако предполагая наличие когерентного вращения между соседними наблюдениями, отстоящими по времени на несколько месяцев друг от друга, нам удалось значительно улучшить статистику и ограничить период с гораздо более высокой точностью, что позволило обнаружить постоянное ускорение вращения нейтронной звезды.

Мы нашли среднюю скорость раскрутки $\dot{\nu} \approx 4.0\text{--}5.0 \times 10^{-13}$ Гц s^{-1} , что всего в два-три раза меньше, чем у IGR J17480–2446, обладающей производной частоты $\dot{\nu} \approx 1.2 \times 10^{-12}$ Гц s^{-1} ([Cavecchi et al., 2011](#); [Patruno et al., 2012](#)).

Столь значительная средняя скорость раскрутки, если она будет подтверждена будущими наблюдениями, может свидетельствовать о том, что XB091D вращается неравномерно, и в этом случае оценка его магнитного поля должна быть ниже, чем равновесное значение $B \simeq 1.4 \times 10^{12}$ Гс. Средняя скорость раскрутки IGR J17480–2446 хорошо согласуется с угловым моментом аккреционного диска, учитывая наблюдаемую светимость $2\text{--}7 \times 10^{37}$ эрг s^{-1} и независимые оценки внутреннего радиуса аккреционного диска из квазипериодических колебаний ([Papitto et al., 2011](#)). Из простых соображений крутящий момент, передаваемый нейтронной звезде аккрецируемой материей в кеплеровском диске составляет $N = 2\pi I\dot{\nu} = \dot{M}\sqrt{GMR_{in}}$, где I — момент инерции нейтронной звезды, обычно принимаемый за 10^{45} г cm^2 . Таким образом, мы можем примерно оценить внутренний радиус диска $R_{in} \simeq 30$ км и соответствующее магнитное поле $B \simeq 5 \times 10^8$ Гс при вычислении для минимального наблюдаемого темпа аккреции $\dot{M} = 2.6 \times 10^{-9} M_\odot \text{ год}^{-1}$. Эти простые вычисления дают результаты, очень похожие на IGR J17480–2446: $R_{in} \lesssim 20$ км, $B \simeq 7 \times 10^8$ Гс ([Papitto et al., 2011](#)). Наблюдаемая средняя скорость раскрутки не совместима с этой простой моделью для максимального наблюдаемого темпа аккреции $\dot{M} = 1.0 \times 10^{-8} M_\odot \text{ год}^{-1}$, поскольку она дает R_{in} меньше 10 км.

Неясно, до какой степени оценка \dot{P} зависит от ускорения пульсара по лучу зрения a_l

в гравитационном поле шарового скопления, которое добавляет член a_l/c к \dot{P}/P . Тем не менее, наибольшее известное абсолютное значение \dot{P}/P у пульсаров в шаровых скоплениях (а именно у пульсара B1718–19 в NGC 6342) составляет $\dot{P}/P \approx 1 \times 10^{-15} \text{ с}^{-1}$. Эта оценка может быть использована в качестве верхнего предела для значения a_l/c у пульсаров в шаровых скоплениях. Поэтому мы не ожидаем, что неучтенное ускорение существенно повлияет на нашу оценку скорости раскрутки нейтронной звезды.

С другой стороны известно, что многие аккрецирующие рентгеновские пульсары (включая LMXB) испытывают длительные эпизоды ускорения и замедления вращения, в то же время оставаясь вблизи равновесного периода (e.g. Chakrabarty et al., 1997; Bildsten et al., 1997; Perna et al., 2006). Предпоследний набор данных на Рис. 4.9, если оценка из него будет подтверждена, показывает по меньшей мере один переход от ускорения к замедлению вращения. Поэтому мы не можем исключить равновесное вращение нейтронной звезды в XB091D и, следовательно, большее значение его магнитного поля $B \simeq 1.4 \times 10^{12} \text{ Гс}$.

XB091D демонстрирует сравнительно небольшие изменения светимости в течение 11-летнего наблюдательного интервала (см. Рис. 4.11), который увеличивается до 12 лет, если мы включаем в рассмотрение наблюдение ObsID 0112570601 конца 2000 года с очень большим углом отклонения от оси, которое, однако, имеет схожий поток в каталоге 3XMM-DR5. Жесткий рентгеновский спектр (см. Рис. 4.10) источника типичен для LMXB, однако форма рентгеновского спектра не может быть единственной причиной, по которой можно отбросить другие возможные интерпретации, такие, например, как массивная рентгеновская двойная. Но имея в виду ассоциацию источника с шаровым скоплением, мы уверенно классифицируем источник как LMXB. Предполагая 100% /по времени рабочий цикл и устойчивую аккрецию на наблюдаемом уровне, возможно оценить время, необходимое чтобы раскрутить XB091D до миллисекундного периода, $P/\dot{P} \simeq 50\text{--}100 \times 10^3 \text{ лет}$. Экстраполируя в прошлое, XB091D хватило бы всего 1 млн. лет или даже меньше, чтобы раскрутиться с периода 10 с до наблюдаемого значения.

4.2.5.1 Свойства шарового скопления B091D и сравнение с Terzan 5

Для сравнения B091D и скопления Terzan 5, где находится один из самых медленных известных аккрецирующих рентгеновских пульсаров (Papitto et al., 2011), мы использовали архивные изображения и измерения дисперсии скоростей звезд и звездных популяций обоих скоплений из литературы. Зная структурные параметры скопления (например, центральную звездную плотность ρ_0 и радиус ядра r_c) и центральную дисперсию скоростей звезд σ_0 в ядрах скоплений, мы можем напрямую сравнить количество событий формирования LMXB путем приливного захвата, используя соотношение для частоты сближений из Verbunt & Hut (1987):

$$\Gamma \propto \rho_0^2 r_c^3 / \sigma_0 \quad (4.2)$$

Terzan 5 представляет собой массивное ($M = 2 \times 10^6 M_\odot$), богатое тяжелыми элементами ($[\text{Fe}/\text{H}] \sim 0 \text{ dex}$) скопление, содержащее большое количество рентгеновских двойных систем. У него несколько разных звездных населений (Ferraro et al., 2009), так что считается, что это ядро карликовой галактики, сильно ободранной Млечным Путем. Скопление имеет небольшой радиус ядра ($5.9'' = 0.24 \text{ пк}$), очень высокую центральную звездную плотность $\rho_0 \sim 1\text{--}4 \times 10^6 M_\odot \text{ пк}^{-3}$ и приливной радиус $\approx 6.7 \text{ пк}$ (Lanzoni et al., 2010). Его

центральная дисперсия скоростей оценивается в $\sigma_0 = 12.7 \text{ км с}^{-1}$ (Gnedin et al., 2002). Terzan 5 имеет одно из плотнейших звездных ядер среди известных шаровых скоплений в нашей Галактике, и скорее всего, находится вблизи точки коллапса ядра (Djorgovski & King, 1986), что весьма важно для гипотезы, в которой тесные двойные системы формируются путем приливных захватов и тройных взаимодействий (Cohn et al., 2002).

Скопление B091D было включено в состав выборки шаровых скоплений M31 с дисперсией скоростей звезд, измеренной с помощью оптических спектров высокого разрешения (Strader et al., 2011). Тем не менее, их динамические модели основаны на изображениях с наземных телескопов и таким образом могут быть неточными.

Мы загрузили оптические изображения высокого разрешения скопления B091D с Космического телескопа им. Хаббла из архива космических телескопов Barbara A. Mikulski¹⁴. Они были получены в рамках программы HST GO № 10273 “Точное картирование микролинзирующего населения M31” (P.I.: A. Crots). Скопление расположено близко к краю поля зрения на двух экспозициях в фильтрах $F555W$ (время экспозиции $t_{exp} = 151 \text{ с}$) и $F814W$ ($t_{exp} = 457 \text{ с}$), полученных на детекторе HST ACS WFC. Несколько пикселей на изображении в фильтре $F814W$ близко к ядру кластера перенасыщены. Мы создали функции рассеяния точки HST двух фильтров используя ПО TINYTIM (Krist et al., 2011), а затем запускали код GALFIT двумерной аппроксимации профилей яркости (Peng et al., 2002) и вписывали профиль Кинга (1966) в изображение B091D маскируя перенасыщенные пиксели в фильтре $F814W$.

Были получены следующие параметры для профиля в фильтре $F555W$: радиус ядра $r_c = 0.110'' = 0.42 \text{ пк}$, радиус обрыва $r_t = 7.1'' = 27 \text{ пк}$, центральная поверхностная яркость $\mu_{0,555} = 13.61 \text{ зв. вел.} \cdot \text{угл. сек}^{-2}$ или $I_0 = 1.31 \times 10^5 L_\odot \text{ пк}^{-2}$, что соответствует $\rho_0 \approx 8 \times 10^5 M_\odot \text{ пк}^{-3}$, эллиптичность $e = 0.92$. Неопределенности структурных параметров составляют порядка 5–7%. Параметры, полученные из аппроксимации моделью изображения в фильтре $F814W$ ($r_c = 0.15''$, $r_t = 6.3''$, $\mu_{0,814} = 13.44 \text{ зв. вел.} \cdot \text{угл. сек}^{-2}$, $e = 0.89$) согласуются в пределах погрешности с результатами, полученными из фильтра $F555W$, за исключением радиуса ядра, которое, вероятно, подвержено влиянию перенасыщенных пикселей. Заметим, что Agar & Barmby (2013) использовали тот же самый набор данных и выполняли аналогичный анализ. Тем не менее, по какой-то причине их значения центральной поверхностной яркости и радиуса ядра, полученные в фильтра $F555W$ отличаются от фильтра $F814W$ почти на три порядка и выглядят весьма нереалистично. Последний набор параметров ($F814W$) достаточно хорошо согласуется с нашими оценками. Отметим, что наше значение r_c несколько меньше радиуса ядра $R_0 = 0.54 \text{ пк}$ в работе Peacock et al. (2010), полученного из анализа наземных изображений в ближнем инфракрасном диапазоне в фильтре K .

Следуя Richstone & Tremaine (1986) и преобразовывая в соответствующие единицы, мы оцениваем динамическое отношение масса–светимость в фильтре V в B091D как: $(M/L)_V \approx 333\sigma_0^2/(r_c I_0)$, где σ_0 — центральная проецированная дисперсия скоростей звезд в км с^{-1} , r_c — радиус ядра в пк, I_0 — центральная поверхностная яркость в $L_\odot \text{ пк}^{-2}$. Апертурная коррекция для наблюдаемых значений $\sigma = 18.6 \pm 1.0 \text{ км с}^{-1}$ (Strader et al., 2011) получается путем интегрирования модели Кинга $\sigma_0 = 21.0 \pm 1.3 \text{ км с}^{-1}$, следовательно, $(M/L)_{V,dyn} = 2.6 \pm 0.4 (M_\odot/L_\odot)_V$ или $M_{dyn} = (9.6 \pm 1.5) \times 10^5 M_\odot$ принимая $V = 15.39 \text{ зв. вел.}$

Подставляя эти значения в уравнение 4.2, мы оцениваем отношение темпа звездных

¹⁴<http://mast.stsci.edu/>

сближений в Terzan 5 и B091D: $\Gamma_{\text{Terzan 5}}/\Gamma_{\text{B091D}} \sim 0.7 \pm 0.3$ что означает, что формирование LMXB путем захвата в ядре B091D в 1.5 раза более вероятно, чем в Terzan 5 — одном из самых плотных шаровых скоплениях в нашей Галактике, которое также обладает наибольшим количеством рентгеновских источников из известных шаровых скоплений (Heinke et al., 2006). Так как было показано, что количество сближений Γ коррелирует с количеством рентгеновских двойных звезд в шаровых скоплениях (Pooley et al., 2003), мы можем ожидать, что B091D также будет весьма плодовитым шаровым скоплением, где население рентгеновских двойных аналогично или даже больше, чем у Terzan 5, а новые системы непрерывно формируются в текущую эпоху.

Caldwell et al. (2011) сообщают, что B091D имеет старое звездное население ($t \approx 12$ млрд. лет) и металличность $[\text{Fe}/\text{H}] = -0.70$ dex, что делает его представителем “красных” богатых металлами шаровых скоплений. Для звездной начальной функции масс (initial mass function, IMF) Kroupa (2002) эти параметры соответствуют отношению масса-светимость для звездного населения $(M/L)_{*,V} = 2.6(M_{\odot}/L_{\odot})$. Это замечательное согласие с динамическим $(M/L)_{V,\text{dyn}}$ предполагает, что скопление B091D не испытывало потерь звездной массы из-за приливного обдирания M31 после динамической релаксации и сегрегации звезд по массам, если оно было рождено с IMF Kroupa.

В рамках простой сферически-симметричной модели, приближительная временная шкала релаксации двух тел в B091D составляет $t_{\text{relax}} \approx 1$ млрд. лет (Spitzer & Hart, 1971; Spitzer, 1987). Таким образом, не ожидается, что звезды подверглись сегрегации по массе (при которой маломассивные звезды мигрируют наружу, а массивные объекты, включая нейтронные звезды — в ядро), потому что это происходит на временной шкале $t_{*,s} \approx 15t_{\text{relax}}$ (Baumgardt et al., 2002). Следовательно, сближения с M31 должны были вызвать равное приливное обдирание для звезд всех масс. Это делает скопление похожим на значительно более массивные ультракомпактные карликовые галактики (Drinkwater et al., 2003; Chilingarian et al., 2011), по крайней мере, некоторые из которых были сформированы путем приливного обдирания и до сих пор содержат центральные черные дыры от своих предшественников (Seth et al., 2014), и на компактные эллиптические галактики, также образованные приливным обдиранием (Chilingarian et al., 2009a; Chilingarian & Zolotukhin, 2015). Имея в виду, что скопление Terzan 5, содержащее другой медленный рентгеновский пульсар, также считается ободраным ядром карликовой галактики, встает вопрос, есть ли в ядерных звездных скоплениях какие-то специфические условия, которые способствуют формированию LMXB. Кажется естественным, что шаровые скопления с несколькими звездными населенными поддерживают более широкий набор эволюционных путей для LMXB, чем шаровые скопления с одним звездным населением, где запас разных звезд-доноров более ограничен.

Мы также сравниваем другой динамический параметр для этих двух шаровых скоплений — удельный темп сближений двойной системы, $\gamma \propto \rho_0/\sigma_0$ (Verbunt, 2003; Verbunt & Freire, 2014). Ожидается, что более высокий показатель γ указывает на более высокий уровень обменных сближений в шаровом скоплении и, следовательно, более высокую наблюдаемую частоту продуктов обменных сближений — таких, как изолированные пульсары, медленные молодые нейтронные звезды и другие виды экзотических объектов, которые, как считается, образуются в результате разрыва двойных систем. Время жизни двойной системы до следующего сближения, которое увеличивает ее шансы на разрушение или обмен звездой-компаньоном, пропорционально $1/\gamma$. В единицах эталонного шарового

скопления М4 из [Verbunt & Freire \(2014\)](#), $\gamma_{\text{B091D}} = 14.6 \gamma_{\text{M4}}$. Это ставит В091D в топ-5 шаровых скоплений нашей Галактики по этому параметру.

4.2.5.2 Возраст системы и сценарии формирования

[Caldwell et al. \(2011\)](#) оценил возраст шарового скопления В091D как 12 млрд. лет. Существует несколько эволюционных последовательностей двойных звезд, образованных более 10 млрд. лет назад, которые начинают эпизод аккреции требуемой интенсивности в настоящую эпоху и, следовательно, могут объяснять происхождение ХВ091D. Например, в [Podsiadlowski et al. \(2002\)](#) двойные системы с исходной массой вторичной звезды M_2 от 1.0 до $1.2 M_{\odot}$, начальным орбитальным периодом P от 0.5 до 100 дней, демонстрируют эпизоды аккреции длительностью порядка $\simeq 100$ млн. лет после $\simeq 10\text{--}12$ млрд. лет эволюции, достигая максимального темпа аккреции $\dot{M}_{\text{peak}} \simeq \text{несколько} \times 10^{-8} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$ при среднем темпе $\langle \dot{M} \rangle \simeq \text{несколько} \times 10^{-9} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$. Это показывает, что сценарий первичного происхождения системы ХВ091D, в котором двойная сформировалась на ранних эпохах существования своего шарового скопления около 12 млрд. лет назад и недавно начала наблюдаемый эпизод аккреции, не запрещен эволюционными теориями изолированных двойных систем.

Сценарий, при котором ХВ091D содержит первичную нейтронную звезду должен объяснить как нейтронная звезда, которая образовалась 12 млрд. лет назад, сохранила вероятное значение ее текущего магнитного поля $B \simeq 1.4 \times 10^{12}$ Гс, при условии, что нейтронные звезды, как предполагают, рождаются с магнитным полем $B \simeq 10^{13}\text{--}10^{14}$ Гс ([Faucher-Giguère & Kaspi, 2006](#)). Неясно, сохраняют ли нейтронные звезды даже без аккреции свое магнитное поле в течение длительного времени. Некоторые модели предполагают возможный распад магнитного поля с характерным временем затухания от $\sim 10^6$ (e.g. [Narayan & Ostriker, 1990](#)) до $\sim 10^8$ лет (см., например, [Bhattacharya et al., 1992](#)). Учитывая отсутствие консенсуса по поводу уменьшения магнитного поля нейтронных звезд, мы не можем отбросить гипотезу первичного происхождения нейтронной звезды в ХВ091D. В этом контексте мы отмечаем, что [Ivanova et al. \(2008\)](#) в своем моделировании обнаружили, что менее 10% первичных двойных систем в шаровом скоплении, переживших взрыв сверхновой без распада, остаются в исходной системе после 11 млрд. лет эволюции (см. их таблицу 4). В случае, если ХВ091D содержит первичную нейтронную звезду, с большой вероятностью она должна была бы приобрести нынешнюю звезду-компаньон в более поздние эпохи. Тогда наиболее вероятным способом приобретения звезды-донора является обменное взаимодействие двойных систем ([Verbunt & Freire, 2014](#)). Это подтверждается, в частности, тем фактом, что обменные сближения предпочтительнее в широких двойных системах, таких, как ХВ091D с орбитальными периодами более, чем 1 день (e.g. [Verbunt, 2003](#)).

Альтернативой этой гипотезе является сценарий формирования нейтронной звезды в старом шаровом скоплении через аккреционный коллапс (accretion induced collapse, АИС), когда массивный ($\simeq 1.2M$) ONeMg белый карлик (white dwarf, WD) аккрецирует вещество звезды-компаньона до тех пор, пока не достигнет предела Чандрасекара $M = 1.44M_{\odot}$. АИС, как предполагается, ответственен за существование в шаровых скоплениях медленных изолированных пульсаров с высокими магнитными полями (например, [Lyne et al., 1996](#); [Breton et al., 2007](#)) и может объяснить происхождение некоторых медленно аккрецирующих рентгеновских пульсаров, например, 4U 1626–67 (e.g. [Yungelson et al., 2002](#)),

хотя событие АИС никогда непосредственно не наблюдалось. [Ivanova et al. \(2008\)](#) утверждают, что в типичном шаровом скоплении с возрастом 9.5–12.5 млрд. лет производство ЛМХВ через АИС в два-три раза более эффективно, чем любой другой динамической канал формирования, например, физические столкновения, приливные захваты и обменные взаимодействия. Шаровое скопление типа Terzan 5 (а, следовательно, и очень похожее на него В091D), как полагают, производит путем аккреционного коллапса 9.35 ± 1.20 ЛМХВ за миллиард лет в возрасте 11 ± 1.5 млрд. лет ([Ivanova et al., 2008](#)), т.е. достаточно значительное количество, даже принимая во внимание короткое время жизни таких двойных систем. Одной из характерных черт нейтронных звезд, сформированных в процессе аккреционного коллапса, является их низкая масса, $M_{\text{NS}} \simeq 1.26 M_{\odot}$. Мы, однако, сомневаемся, что возможно ограничить массу нейтронной звезды в этой системе, чтобы подтвердить или отбросить гипотезу об АИС. С текущим поколением астрономических инструментов невозможна оптическая идентификация и спектроскопические наблюдения звезды-компаньона для объекта в шаровом скоплении на расстоянии М31. В случае происхождения нейтронной звезды в ХВ091D путем аккреционного коллапса есть несколько причин подозревать, что в настоящее время мы наблюдаем эпизод аккреции, связанный с новым компаньоном, приобретенным в результате события динамического обмена с участием первичной двойной системы, в которой случился АИС. Во время АИС белый карлик теряет около $0.2 M_{\odot}$ в форме энергии связи и, возможно, некоторую массу в виде оболочки сверхновой, что делает орбиту двойной системы шире, отдаляя звезды друг от друга и тем самым останавливая перенос массы. Время между АИС и возобновлением переноса массы в ультракомпактной системе с белым карликом в качестве донора составляет $\simeq 10^8$ лет ([Verbunt et al., 1990](#)), хотя, очевидно, это сильно зависит от свойств доноров — например, от наличия магнитного торможения, которое приводит компаньон в контакт с его полостью Роша, или от темпа увеличения радиуса вторичной звезды в связи с эволюцией ее ядра. С другой стороны, донор теряет значительную часть своей массы для подпитки события АИС, так что он может быть не способен поддерживать интенсивную аккрецию впоследствии, которую мы наблюдаем в настоящее время. Продолжительные эпохи без аккреции увеличивают шансы на двойной обмен в шаровом скоплении с высоким удельным темпом сближений γ .

Для запуска события АИС потеря массы первоначального донора должна быть в пределах $0.2\text{--}0.3 M_{\odot}$. Из нашего орбитального решения мы оцениваем функцию масс донора в 0.0160, что согласуется с [Esposito et al. \(2016\)](#). Это означает, что минимальная масса донора составляет $M_2 = 0.36 M_{\odot}$, если система видна с ребра, т.е. с наклоном $i = 90^\circ$. Отсутствие рентгеновских затмений в самом длинном наблюдении, которое охватывает весь орбитальный период системы, означает, что мы можем ограничить массу звезды-донора немного сильнее, поскольку наклонение орбиты двойной системы не превышает $\simeq 70^\circ$: $M_2 > 0.38 M_{\odot}$. При случайном распределении углов наклона орбиты имеется 90% априорная вероятность, что мы увидим двойную систему с наклоном $i > 26^\circ$. При наблюдаемой функции масс это наклонение соответствует $M_2 = 1.04 M_{\odot}$. Таким образом, 90% доверительный интервал для массы звезды-донора составляет $0.38 \leq M_2 \leq 1.04 M_{\odot}$. Фактически для шарового скопления возрастом 12 млрд. лет В091D точка поворота главной последовательности находится на массе $0.8 M_{\odot}$. Все звезды в В091D с массой $\gtrsim 1.0 M_{\odot}$ должны были проэволюционировать в красных гигантов и даже уже стать белыми карликами. Поэтому разумный верхний предел массы донора $M_2 \simeq 0.8\text{--}0.9 M_{\odot}$, что соответ-

ствуует маломассивным субгигантам и звездам, покидающим главную последовательность.

Используя формулу Eggleton (1983) и учитывая ограничения для отношения масс ($M_1 = 1.25 M_\odot$, $M_2 = 0.9 M_\odot$ и $M_1 = 2.0 M_\odot$, $M_2 = 0.4 M_\odot$), легко оценить размер полости Роша для звезды-компаньона: $1.64 \leq R_{L_2} \leq 2.24 R_\odot$. Чтобы заполнить свою полость Роша донор таким образом должен быть проэволюционировавшей звездой, которая недавно покинула главную последовательность и ее радиус увеличился до примерно $2 R_\odot$. Нынешний высокий темп аккреции может быть объяснен тем, что он вызван эволюцией вторичного компонента с быстрым увеличением радиуса.

Очень маловероятно, что маломассивная звезда с $M_2 \simeq 0.4\text{--}0.5 M_\odot$ (например, донор, который переносом своей массы вызвал событие AIC) может достигать радиуса $1.6 R_\odot$. Это, однако, может происходить под влиянием рентгеновского облучения поверхности донора, но этот эффект в настоящее время малоизучен. Для наиболее вероятного значения массы донора $M_2 = 0.8 M_\odot$ наклонение плоскости орбиты составляет $\simeq 30^\circ$, а расстояние между компонентами — $6.27\text{--}6.96 R_\odot$ ($0.029\text{--}0.032$ а.е.). Это делает XB091D самой широкой известной аккрецирующей двойной системой в шаровых скоплениях.

Теория раскрутки пульсаров (Bhattacharya & van den Heuvel, 1991) предполагает, что после того, как фаза классического пульсара, подпитываемая кинетической энергией вращения, заканчивается с $P_{\text{spin}} \approx 1\text{--}10$ с, вращение нейтронных звезд может быть ускорено аккрецией вещества со звезды донора в двойной системе до $P_{\text{spin}} \approx 1\text{--}10$ мс. XB091D очень хорошо вписывается в эту картину, будучи наблюдаемой на раннем этапе фазы раскрутки аккрецией. В то время как очень похожий пульсар IGR J17480–2466 из скопления Terzan 5 является умеренно раскрученной системой, XB091D представляет собой недостающий пример нераскрученной нейтронной звезды, которая тем не менее интенсивно аккрецирует. Конечной точкой эволюции XB091D через несколько миллионов лет, вероятно, будет миллисекундный радиопульсар на широкой (\simeq несколько дней) орбите с компаньоном-белым карликом. Миллисекундные пульсары весьма многочисленны, но их предшественники, такие как IGR J17480–2466 и XB091D при высоких темпах переноса массы имеют относительно короткие времена жизни, так что мы наблюдаем совсем мало таких систем.

4.2.6 Выводы

Мы сообщаем о независимом обнаружении яркого ($L_X = 3\text{--}12 \times 10^{37}$ эрг с⁻¹) аккрецирующего рентгеновского пульсара в галактике Андромеды в публичных данных 38 наблюдений, полученных на обсерватории *XMM-Newton* в период между 2000 и 2013 годом. В 13 наблюдениях мы обнаружили пульсирующее на 15–30% излучение с периодом 1.2 с. Наш анализ может быть полностью повторен в Интернете с помощью фотонной базы данных *XMM-Newton*, доступной по адресу <http://xmm-catalog.irap.omp.eu>.

Мы показываем, что эта рентгеновская двойная связана с массивным шаровым скоплением с коллапсировавшим ядром B091D возрастом 12 млрд. лет, обладающем высоким темпом звездных сближений. Поэтому эта система является весьма необычным примером нераскрученного, интенсивно аккрецирующего пульсара. При периоде 1.2 с нейтронная звезда в этой системе вращается в 10 раз медленнее, чем предыдущий самый медленный известный рентгеновский пульсар в шаровом скоплении — умеренно раскрученная система IGR J17480–2446 в скоплении Terzan 5.

Из анализа временных рядов рентгеновских фотонов мы оценили параметры орбиты

двойной системы, включая ее орбитальный период 30.5 ч. Объединив несколько соседних по времени наборов данных с целью увеличения фотонной статистики, мы получили фазово-сопряженное решение в 9 группах наблюдений, распределенных в интервале 11 лет, и нашли среднее ускорение вращения нейтронной звезды $\dot{P} \simeq -7.1 \times 10^{-13} \text{ с с}^{-1}$. Наблюдаемый тренд раскрутки, однако, имеет по крайней мере один эпизод замедления. Если система не находится в равновесном вращении и ускорение вращения сохранится, мы можем оценить, что аккреция началась менее, чем 1 млн. лет назад, и всего через $\approx 10^5$ лет система станет обычным миллисекундным пульсаром.

Обнаруженный средний темп раскрутки совпадает с ожидаемым от аккреции углового момента кеплеровского диска с темпом аккреции $\dot{M} \simeq 3 \times 10^{-9} M_{\odot} \text{ год}^{-1}$, если внутренняя граница диска находится на $R_{in} \simeq 30$ км. Если предположить, что нейтронная звезда в XB091D не находится в равновесном вращении, мы можем оценить ее магнитное поле $B \simeq 5 \times 10^8$ Гс. Наблюдаемая один раз перемена знака ускорения, однако, является аргументом в пользу равновесного вращения с большим значением магнитного поля $B \simeq 1.4 \times 10^{12}$ Гс. Эта гипотеза также поддерживается наблюдаемым жестким рентгеновским спектром. Из расстояния между компонентами, размера полости Роша звезды-донора и факта постоянной аккреции в системе последние 12 лет, мы приходим к выводу, что звезда-компаньон должна быть немного проэволюционировавшей маломассивной звездой с массой, близкой к точке поворота главной последовательности для старого шарового скопления возрастом 12 млрд. лет $M_2 \simeq 0.8 M_{\odot}$.

Основываясь на этих данных мы не можем объективно выбрать какую-то одну из двух гипотез происхождения нейтронной звезды в системе — первичное происхождение на ранних этапах эволюции шарового скопления либо формирование в более поздние эпохи, например, путем аккреционного коллапса. Тем не менее, в обоих случаях весьма маловероятно, что мы наблюдаем первичную двойную систему, в которой сформировалась нейтронная звезда. В случае АИС система, скорее всего, впоследствии пережила обменное взаимодействие, и нейтронная звезда захватила неистощенную маломассивную звезду-донор. В случае первичной нейтронной звезды она должна была приобрести звезду-компаньона после того, как была сформирована. В обоих случаях, скорее всего, получение звезды-донора было связано с обменным взаимодействием, и компаньон начал переполнять свою полость Роша совсем недавно, менее 1 млн. лет назад. Эти сценарии формирования находятся в соответствии с измеренными свойствами XB091D и соответствуют ожиданиям, которые следуют из глобальных свойств шарового скопления, а именно высокой удельной вероятности сближения для двойной системы γ , являющейся индикатором частоты двойных систем, образованных через обменные взаимодействия. XB091D — первый аккрецирующий нераскрученный рентгеновский пульсар, который дополняет стандартную картину раскрутки пульсаров.

4.2.7 Тонкий поиск периода пульсаций и анализ ошибок для техники сложения эпох

4.2.7.1 Анализ ошибок для сложения эпох одиночных наблюдений

Здесь мы следуем Leahy et al. (1983); Leahy (1987), чтобы выполнить поиск периода с использованием техники сложения эпох и сделать дополнительный шаг и оценить погрешность определения периода из статистических соображений.

Рассмотрим гармонический сигнал с периодом P над некоторым постоянным фоном. Форма импульса в этом случае выражается как:

$$\begin{aligned} f(t) &= a + b \sin t \\ a &= N_\gamma/T \end{aligned} \quad (4.3)$$

где b — амплитуда импульса, a — фоновое значение, которое мы оцениваем из общего числа фотонов N_γ , зарегистрированных в течение времени экспозиции T . При этом мы считаем, что коэффициент заполнения экспозиции составляет 100%, то есть во время экспозиции не было никаких временных пробелов из-за, например, вспышек мягких протонов.

Если мы выполним теперь сложение эпох с немного другим периодом $P + \Delta P$, $\Delta P \ll P$, это вызовет сдвиг по фазе в последнем импульсе:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi T \Delta P}{P^2} \quad (4.4)$$

В дальнейшем, мы возьмем непрерывный предел и заменим все суммы интегралами. Дискретизация незначительно меняет окончательные результаты, потому что снижение чувствительности метода составляет лишь 3.3% при $n = 10$ окон в фазе и 0.8% при $n = 20$, что было использовано нами в данном случае (Leahy, 1987). Тогда мы можем оценить фазу, смазавшую форму сложенного импульса в виде функции $\Delta\phi$:

$$\begin{aligned} f_1(t, \Delta\phi) &= \frac{1}{\Delta\phi} \int_0^{\Delta\phi} (a + b \sin(t - \tau)) d\tau = \\ &= a + \frac{2b}{\Delta\phi} \sin \frac{\Delta\phi}{2} \sin(t - \frac{\Delta\phi}{2}) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Теперь мы можем вычислить S статистику (Leahy et al., 1983) как

$$\begin{aligned} S(\Delta\phi) &= \int_0^{2\pi} \frac{(f_1(t, \Delta\phi) - a)^2}{f_1(t, \Delta\phi)} dt \approx \frac{1}{a} \int_0^{2\pi} (f_1(t, \Delta\phi) - a)^2 dt = \\ &= \frac{2\pi b^2}{a \Delta\phi^2} (1 - \cos \Delta\phi) = \frac{4\pi b^2}{a \Delta\phi^2} \sin^2 \frac{\Delta\phi}{2} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Для простоты вычислений, здесь мы предполагаем, что пульс неглубокий (например $b \ll a$) и, следовательно, мы выносим $1/a$ за знак интеграла. Более общий аналитический расчет громоздок и незначительно изменит результат, потому что он слабо зависит от отношения b/a как $\sim \sqrt{1 - (b/a)^2}$.

Теперь имея в виду, что S — это на самом деле статистика χ^2 , мы можем оценить погрешность периода путем решения уравнения $S(\Delta\phi) = S(0) - 1$. Разложение в ряд Тейлора уравнения 4.6 до 4-й степени по $\Delta\phi$ дает:

$$\frac{\pi b^2}{a} \left(1 - \frac{\Delta\phi^2}{12}\right) = \frac{\pi b^2}{a} - 1 \quad (4.7)$$

Решая относительно $\Delta\phi$ и вводя глубину пульсаций $A = b/a$ (как в Leahy, 1987):

$$\Delta P = \sqrt{\frac{3}{\pi^3} \frac{P^2}{A \sqrt{N_\gamma T}}} \quad (4.8)$$

4.2.7.2 Аналитическая формулировка сложения эпох когерентных пульсаций в двух наблюдениях

Рассмотрим теперь гармонический сигнал с периодом P , зарегистрированный в двух наблюдениях с временами экспозиции T и T/n (не ограничивая общности, мы берем вещественное число $n \geq 1$). Второе наблюдение начинается в момент времени mT (m вещественное число, $m \geq 1$). Форма сложённой фазы, получающаяся из суммы двух наблюдений приобретает вид:

$$f_1(t, \Delta\phi, m, n) = \frac{1}{\Delta\phi} \left(\int_0^{\Delta\phi} (a + b \sin(t - \tau)) d\tau + \int_{m\Delta\phi}^{(m+1/n)\Delta\phi} (a + b \sin(t - \tau)) d\tau \right) \quad (4.9)$$

Здесь второй интеграл имеет множитель $(1/\Delta\phi)$ вместо $(n/\Delta\phi)$, потому что будет иметь вклад $(1/n)$ в общий импульс. Опуская громоздкие вычисления и тригонометрические преобразования, S статистика, вычисленная в приближении небольшого импульса ($b \ll a$, см. выше) выглядит следующим образом:

$$S(\Delta\phi, m, n) = \frac{4\pi b^2}{a\Delta\phi^2} \left(\sin^2 \frac{\Delta\phi}{2} + \sin^2 \frac{\Delta\phi}{2n} + 2 \sin \frac{\Delta\phi}{2} \sin \frac{\Delta\phi}{2n} \cos\left(\frac{\Delta\phi}{2} - \frac{\Delta\phi}{2n} - m\Delta\phi\right) \right) \quad (4.10)$$

Это выражение неотрицательно для любого $\Delta\phi$ и имеет несколько интересных свойств. Оно практически идентично световому узору, образованному дифракцией когерентного источника на двойной щели, с щелями разной ширины. Добавление второго набора данных, отделенного от первого по времени, вводит модуляцию S статистики из единичного наблюдения (уравнение 4.6) с амплитудой $(1 + 1/n)^2$ и высокой частотой $m/2\pi$ (см. Рис. 4.13). Затем в зависимости от статистики, определяемой общим числом зарегистрированных фотонов, область достоверности 1σ для периода P может либо сжиматься в один модулированный пик так, что погрешность периода ΔP будет определяться уравнением, аналогичным уравнению 4.8:

$$\Delta P_{\text{peak}} = \sqrt{\frac{3}{\pi^3}} \frac{P^2 \sqrt{1 + 1/n}}{A \sqrt{N_\gamma T} (m + 1/n)} \quad (4.11)$$

или покрывать несколько вторичных пиков, в этом случае одно значение ΔP становится бессмысленным, потому что реальное значение P может находиться в одном из нескольких вторичных пиков в достоверной области. Множественные решения возникают, когда сдвиг фазы $\Delta\phi$, соответствующий погрешности периода ΔP из уравнения 4.6 (где T исправлено за общее время экспозиции $T_{\text{tot}} = T(1 + 1/n)$) превышает фазовое расстояние между вторичными пиками: $\Delta\phi > 2\pi/m$ принимая $m \ll 1$. Следовательно, мы можем оценить число вторичных пиков n_{sec} в пределах верхней огибающей S -распределения, приравняв фазовый сдвиг к $2\pi n_{\text{sec}}/m$:

$$n_{\text{sec}} = 2 \left\lfloor \sqrt{\frac{3}{\pi^3}} \frac{m}{A \sqrt{a}} \right\rfloor \quad (4.12)$$

Эта величина зависит от потока отсчетов $a = N_\gamma/T_{\text{tot}}$, а не от их количества. Этот вывод выглядит нелогичным на первый взгляд, однако, это тривиально объясняется тем фактом, что мы работаем в фазовом пространстве. Поэтому когда статистика импульсов растет из-за увеличенного времени экспозиции, основной пик становится более узким с точки зрения ΔP , и если мы сохраним расстояние между наблюдениями постоянным, m будет уменьшаться. В случае XB091D $a \approx 0.1$ и $A \approx 0.3$, мы получим $\sim 3m$ вторичных

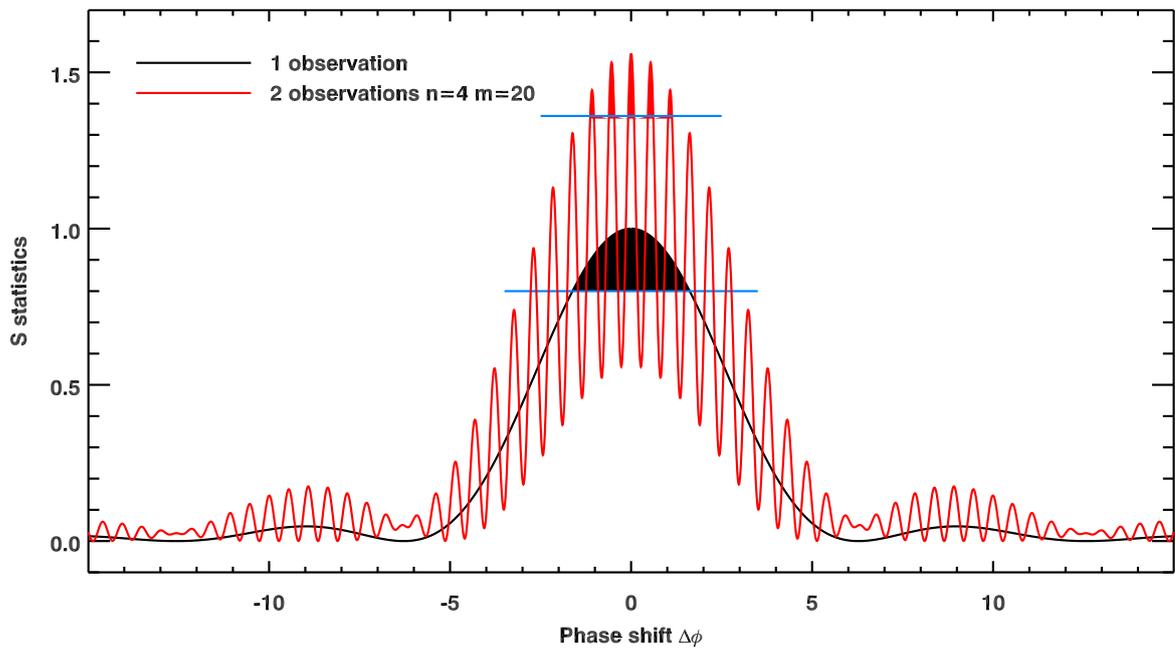


Рис. 4.13: Примеры S статистики для поиска периода (без стохастической компоненты) для одного наблюдения с общей экспозицией T (черная линия) и для двух наблюдений (красная линия) с временем экспозиций $T_1 = T$ и $T_2 = T/4$ и временем начала второго наблюдения $T_s = 12T$. Затемненные области показывают примеры доверительных интервалов: для красной кривой она содержит два вторичных пика по обе стороны от основного.

пиков с обеих сторон от главного, если объединить два наблюдения. Еще одним важным свойством уравнения 4.10 является то, что можно использовать измеренную амплитуду модуляции S статистики для поиска периода в двух наблюдениях с целью оценки возможного изменения периода. Если наблюдаемая модуляция остается близкой к значению, предсказываемому уравнением 4.10 плюс стохастический компонент S_{noise} , со статистикой χ_{n-1}^2 и средним $(n-1)$ (Leahy, 1987), можно сделать вывод, что изменение периода между двумя наблюдениями необнаружимо.

Все расчеты, представленные выше, тривиальным образом обобщаются на случай $N_{obs} > 2$, однако все выражения при этом становятся громоздкими и трудными для понимания. Размер огибающей для области достоверности 1σ , которая может по-прежнему содержать несколько узких пиков, можно оценить в виде:

$$\Delta P_{mult} = \sqrt{\frac{3}{\pi^3}} \frac{P^2}{A\sqrt{N_{\gamma tot} T_{tot}}} \quad (4.13)$$

где T_{tot} — общий интервал хорошего времени (GTI), а $N_{\gamma tot}$ — общее число зарегистрированных фотонов.

4.2.7.3 Регуляризация формы импульса

Мы можем улучшить процедуру поиска периода, полагая форму импульса гладкой. Эта идея аналогична методам регуляризации, используемым при восстановлении изображе-

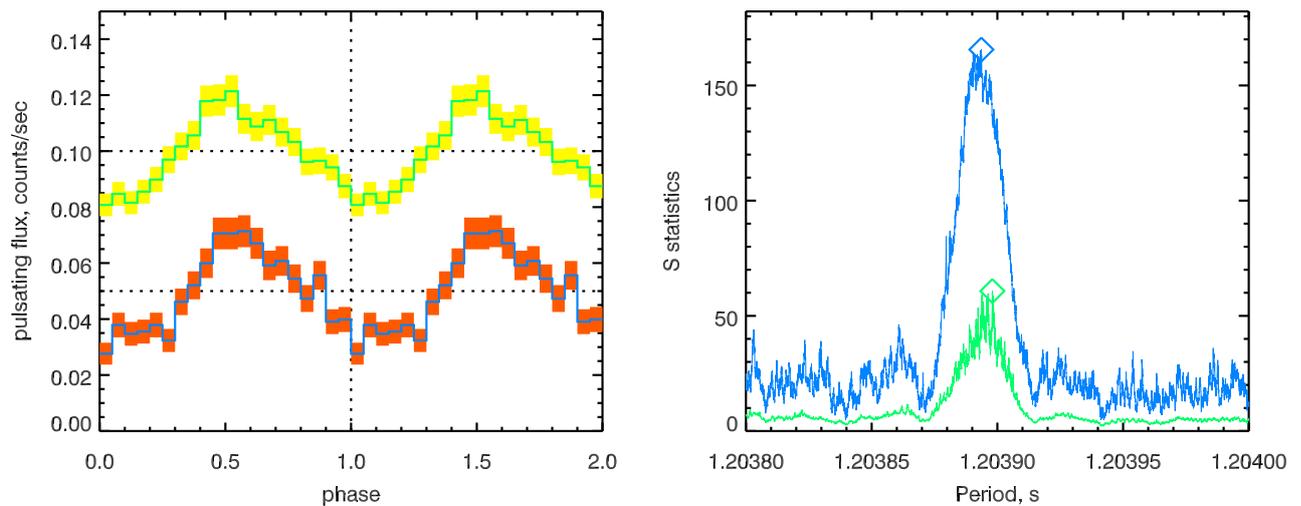


Рис. 4.14: Профиль импульса, полученный из наблюдений 2002-01-06 (ObsID: 0112570101). (Слева) Желтые и красные линии — формы импульса, полученные с регуляризацией и без нее, соответственно. (Справа) Синие и зеленые линии представляют S статистику в зависимости от периода вращения для поиска с регуляризацией и без нее, соответственно.

ний/сигнала, а следовательно, мы можем использовать аналогичный математический аппарат. Пока период определяется путем поиска максимума S статистики, мы вводим коэффициент пенализации, который зависит от формы импульса $p(\phi)$ как:

$$S_{\text{reg}} = S \left(1 + k \int_0^{2\pi} \left(\frac{d^2 p(\phi)}{d\phi^2} \right)^2 d\phi \right)^{1/2} \quad (4.14)$$

Здесь k — положительный коэффициент, который определяет степень регуляризации. Численно вторая производная вычисляется для дискретной формы импульса как $\frac{3}{2}(\text{box}(p, 3) - p)$, где $\text{box}(p, 3)$ обозначает прямоугольную область сглаживания импульсов p с окном в 3 пикселя.

Применение регуляризации к реальным данным находит гораздо более гладкую форму импульса, в то время как периоды всегда остаются в пределах погрешности, прогнозируемой S статистикой или аналитической формулировкой, приведенными выше (уравнение 4.13). Мы подчеркиваем, что мы не сглаживаем фактическую форму импульса, а скорее статистически смещаем поиск периода в сторону более гладкой формы. На Рис. 4.14 (левая панель) мы показываем пример формы импульса, восстановленной из набора данных, полученного в январе 2002 года (ObsID: 0112570101) с использованием и без регуляризации, принимая $k = (2/3)^2$. Правая панель показывает S статистику без использования (синий) и с регуляризацией (зеленый), полученную из поиска периода сложением эпох в 20 окнах по фазе. Таким образом, S статистика включает в себя стохастический вклад с дисперсией $\langle S_{\text{rand}} \rangle = 19$. Как видно на графике, регуляризованное решение лежит в пределах доверительного интервала 1σ , т.е. значения периода согласуются в пределах статистических погрешностей, однако, восстановленная форма импульса выглядит существенно более гладкой в регуляризованном случае.

Заключение

Диссертация посвящена исследованиям редких астрофизических объектов — гипер-ярких рентгеновских источников, внегалактических рентгеновских пульсаров, компактных эллиптических галактик — и кроме этого маломассивных рентгеновских двойных и нормальных галактик. Для исследований используются современные фотометрические и спектральные обзоры и другие большие массивы данных, имеющиеся в Виртуальной Обсерватории.

В Главе 1 описано создание справочного каталога распределений энергии в спектрах галактик RCSED и крупнейшего каталога рентгеновских источников 3XMM. Приводится описание специальных веб-приложений для облегчения работы с различными продуктами данных в этих каталогах; обсуждается фотонная база данных *XMM-Newton*.

Глава 2 содержит результаты отождествления в оптическом и ближнем ИК диапазонах 13 рентгеновских источников и следующие из этих данных ограничения на их физическую природу. Описывается модель облученного аккреционного диска, открывающая возможность наблюдательно эффективного способа определения орбитального периода LMXB. В главе разработан метод классификации неисследованных рентгеновских источников на основании информации, доступной в больших обзорах и Виртуальной Обсерватории.

В Главе 3 представлены результаты исследования нормальных галактик в близкой Вселенной. Описано обнаружение универсального соотношения цвет–цвет–величина в ближнем УФ и оптическом диапазоне для нормальных галактик в данных каталога галактик RCSED. Кроме того приводятся результаты широкомасштабного поиска сЕ галактик — открытие популяции изолированных сЕ. Делается вывод об их приливном обдирании в плотных центрах скоплений и последующем выбросе оттуда в результате эффекта пращи при сближении 3 галактик.

В Главе 4 описывается первый систематический поиск гипер-ярких рентгеновских источников со светимостями свыше 10^{41} эрг с^{-1} . Делается вывод о существовании и наблюдаемости популяции HLX. Описывается исследование переменности внегалактических рентгеновских объектов и открытие первого пульсара XB091D в галактике Андромеды. Показывается, что пульсар XB091D находится в самом начале процесса раскрутки нейтронной звезды аккрецией. Подтверждаются основные выводы стандартной теории эволюции нейтронных звезд в двойных системах и теории образования экзотических двойных систем в плотных шаровых скоплениях с высокими темпами взаимодействия звезд.

На защиту выносятся

1. Отождествление в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах 13 рентгеновских двойных систем из балджа Галактики; ограничения на их физические парамет-

- ры, обнаружение одной системы-кандидата в ультракомпактные рентгеновские двойные; обнаружение маломассивной рентгеновской двойной, аккрецирующей звездный ветер компаньона; разработка и апробация высокоселективного метода отождествления неизученных рентгеновских источников с большой неопределенностью положения в плоскости Галактики при помощи Виртуальной Обсерватории.
2. Соотношение период–величина в ближнем инфракрасном диапазоне для постоянных маломассивных рентгеновских двойных систем.
 3. Универсальное соотношение цвет–цвет–величина в ультрафиолетовом и оптическом диапазонах для нормальных галактик; аналитические функции на ее основе для точного определения фотометрических красных смещений и морфологического типа галактики по минимальному набору наблюдаемых величин.
 4. Открытие методами Виртуальной Обсерватории 184 компактных эллиптических галактик в группах и скоплениях галактик в ближней Вселенной. Открытие 11 изолированных компактных эллиптических галактик и вывод о механизме их выбрасывания из родительских скоплений галактик при помощи эффекта пращи при сближении трех тел.
 5. Каталог RCSED распределений энергии в спектре в 11 полосах в ультрафиолетовом, оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах для 800 299 близких галактик с морфологическими свойствами, а также свойствами звездного населения и ионизованного газа; база данных и веб-приложение для доступа и анализа разнообразных продуктов каталога RCSED в сети Интернет.
 6. Крупнейшие каталоги рентгеновских источников 3XMM-DR5 и 3XMM-DR6; научное веб-приложение для анализа продуктов данных этих каталогов; база данных всех фотонов, когда либо зарегистрированных обсерваторией *XMM-Newton*, и веб-приложение для извлечения барицентрированных и калиброванных по энергии временных рядов фотонов, пригодных для научного анализа, в сети Интернет.
 7. Открытие первого в Туманности Андромеды и самого медленного из известных постоянного рентгеновского пульсара в шаровом скоплении, находящегося на раннем этапе раскручивания, являющегося членом самой широкой из известных в шаровых скоплениях рентгеновских двойных систем.
 8. Первая статистически значимая выборка кандидатов в гипер-яркие рентгеновские источники; ограничение на чистоту выборки кандидатов; вывод о существовании и наблюдаемости популяции гипер-ярких рентгеновских источников.

Благодарности

Автор выражает глубокую благодарность своему постоянному соавтору и научному консультанту Игорю Чилингаряну. Автор благодарен Николаю Ивановичу Шакуре за всестороннюю помощь в ГАИШ МГУ, а также Сергею Фабрике (САО РАН) и Ольге Сильченко (ГАИШ МГУ) за поддержку вошедших в диссертацию исследований в рамках проводимых ими научных программ. Диссертация бы не состоялась без совместных работ с Михаилом Ревнивцевым, оказавшим огромное влияние на развитие научного стиля автора. Особая благодарность Антону Афанасьеву, Святославу Борису, Кириллу Гришину, Евгению Рубцову (Физический факультет МГУ), Ивану Каткову, Анастасии Каспаровой

(ГАИШ МГУ) за помощь в работе с англоязычными материалами. Автор признателен Сергею Волкову за участие в корректуре текста. Отдельная благодарность семье: Анне и Виктории Золотухиным, Екатерине Суховой, Марии Некрасовой и Юрию Золотухину, а также Валентине Некрасовой за моральную поддержку во время работы над диссертацией.

Литература

- Abazajian, K. N., et al. 2009, ApJS, 182, 543, “*The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey*”
- Abbott, B. P., et al. 2016, Physical Review Letters, 116, 061102, “*Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*”
- Adelman-McCarthy, J. K., et al. 2007, ApJS, 172, 634, “*The Fifth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey*”
- Adelman-McCarthy, J. K., et al. 2006, ApJS, 162, 38, “*The Fourth Data Release of the Sloan Digital Sky Survey*”
- Agar, J. R. R. & Barmby, P. 2013, AJ, 146, 135, “*M31 Globular Cluster Structures and the Presence of X-Ray Binaries*”
- Alam, S., et al. 2015, ApJS, 219, 12, “*The Eleventh and Twelfth Data Releases of the Sloan Digital Sky Survey: Final Data from SDSS-III*”
- Alexander, D. M., et al. 2003, AJ, 126, 539, “*The Chandra Deep Field North Survey. XIII. 2 Ms Point-Source Catalogs*”
- Alpar, M. A., Cheng, A. F., Ruderman, M. A., & Shaham, J. 1982, Nature, 300, 728, “*A new class of radio pulsars*”
- Altamirano, D., et al. 2010, ApJL, 712, L58, “*Discovery of a 205.89 Hz Accreting Millisecond X-ray Pulsar in the Globular Cluster NGC 6440*”
- Amorisco, N. C., Evans, N. W., & van de Ven, G. 2014, Nature, 507, 335, “*The remnant of a merger between two dwarf galaxies in Andromeda II*”
- Andrews, B. H. & Martini, P. 2013, ApJ, 765, 140, “*The Mass-Metallicity Relation with the Direct Method on Stacked Spectra of SDSS Galaxies*”
- Archibald, A. M., et al. 2009, Science, 324, 1411, “*A Radio Pulsar/X-ray Binary Link*”
- Arnaud, K. A. 1996, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 101, Astronomical Data Analysis Software and Systems V, ed. G. H. Jacoby & J. Barnes, 17, “*XSPEC: The First Ten Years*”
- Augusteijn, T., van der Hooft, F., de Jong, J. A., van Kerkwijk, M. H., & van Paradijs, J. 1998, A&A, 332, 561, “*Phase-resolved spectroscopy of the low-mass X-ray binaries 1636-536/V 801 Arae and 1735-444/V 926 Scorpii*”
- Bachetti, M., et al. 2014, Nature, 514, 202, “*An ultraluminous X-ray source powered by an accreting neutron star*”
- Bachetti, M., et al. 2013, ApJ, 778, 163, “*The Ultraluminous X-Ray Sources NGC 1313 X-1 and X-2: A Broadband Study with NuSTAR and XMM-Newton*”
- Bahramian, A., et al. 2014, ApJ, 780, 127, “*Discovery of the Third Transient X-Ray Binary in the Galactic Globular Cluster Terzan 5*”
- Baldry, I. K., Glazebrook, K., Brinkmann, J., Ivezić, Ž., Lupton, R. H., Nichol, R. C., & Szalay, A. S. 2004, ApJ, 600, 681, “*Quantifying the Bimodal Color-Magnitude Distribution of Galaxies*”
- Baldwin, J. A., Phillips, M. M., & Terlevich, R. 1981, PASP, 93, 5, “*Classification parameters for the emission-line spectra of extragalactic objects*”
- Ball, G. H., Narayan, R., & Quataert, E. 2001, ApJ, 552, 221, “*Spectral Models of Convection-dominated Accretion Flows*”
- Bandyopadhyay, R. M., Charles, P. A., Shahbaz, T., & Wagner, R. M. 2002, ApJ, 570, 793, “*Infrared Photometric Variability of GX 13+1 and GX 17+2*”

- Bandyopadhyay, R. M., Shahbaz, T., Charles, P. A., & Naylor, T. 1999, MNRAS, 306, 417, “*Infrared spectroscopy of low-mass X-ray binaries - II*”
- Bauer, F. E., Alexander, D. M., Brandt, W. N., Schneider, D. P., Treister, E., Hornschemeier, A. E., & Garmire, G. P. 2004, AJ, 128, 2048, “*The Fall of Active Galactic Nuclei and the Rise of Star-forming Galaxies: A Close Look at the Chandra Deep Field X-Ray Number Counts*”
- Baumgardt, H., Hut, P., & Heggie, D. C. 2002, MNRAS, 336, 1069, “*Long-term evolution of isolated N-body systems*”
- Becker, R. H., White, R. L., & Helfand, D. J. 1995, ApJ, 450, 559, “*The FIRST Survey: Faint Images of the Radio Sky at Twenty Centimeters*”
- Belczynski, K., Bulik, T., Fryer, C. L., Ruiter, A., Valsecchi, F., Vink, J. S., & Hurley, J. R. 2010, ApJ, 714, 1217, “*On the Maximum Mass of Stellar Black Holes*”
- Benjamin, R. A., et al. 2003, PASP, 115, 953, “*GLIMPSE. I. An SIRTf Legacy Project to Map the Inner Galaxy*”
- Bernardi, M., et al. 2003, AJ, 125, 1849, “*Early-type Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey. II. Correlations between Observables*”
- Bertin, E. 2006, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 351, Astronomical Data Analysis Software and Systems XV, ed. C. Gabriel, C. Arviset, D. Ponz, & S. Enrique, 112–+, “*Automatic Astrometric and Photometric Calibration with SCAMP*”
- Bertin, E. 2011, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 442, Astronomical Data Analysis Software and Systems XX, ed. I. N. Evans, A. Accomazzi, D. J. Mink, & A. H. Rots, 435, “*Automated Morphometry with SExtractor and PSFEx*”
- Bertin, E. & Arnouts, S. 1996, A&AS, 117, 393, “*SExtractor: Software for source extraction.*”
- Bertola, F., Capaccioli, M., & Oke, J. B. 1982, ApJ, 254, 494, “*IUE observations of NGC 4649, an elliptical galaxy with a strong ultraviolet flux*”
- Bhattacharya, D. & van den Heuvel, E. P. J. 1991, Phys. Rep., 203, 1, “*Formation and evolution of binary and millisecond radio pulsars*”
- Bhattacharya, D., Wijers, R. A. M. J., Hartman, J. W., & Verbunt, F. 1992, A&A, 254, 198, “*On the decay of the magnetic fields of single radio pulsars*”
- Bildsten, L., et al. 1997, ApJS, 113, 367, “*Observations of Accreting Pulsars*”
- Bird, A. J., et al. 2006, ApJ, 636, 765, “*The Second IBIS/ISGRI Soft Gamma-Ray Survey Catalog*”
- Biviano, A. & Girardi, M. 2003, ApJ, 585, 205, “*The Mass Profile of Galaxy Clusters out to $\sim 2r_{200}$* ”
- Blanc, G. A., Kewley, L., Vogt, F. P. A., & Dopita, M. A. 2015, ApJ, 798, 99, “*IZI: Inferring the Gas Phase Metallicity (Z) and Ionization Parameter (q) of Ionized Nebulae Using Bayesian Statistics*”
- Blanton, M. R., et al. 2003a, ApJ, 594, 186, “*The Broadband Optical Properties of Galaxies with Redshifts $0.02 < z < 0.22$* ”
- Blanton, M. R., et al. 2003b, ApJ, 592, 819, “*The Galaxy Luminosity Function and Luminosity Density at Redshift $z = 0.1$* ”
- Blanton, M. R. & Roweis, S. 2007, AJ, 133, 734, “*K-Corrections and Filter Transformations in the Ultraviolet, Optical, and Near-Infrared*”
- Blanton, M. R., et al. 2005, AJ, 129, 2562, “*New York University Value-Added Galaxy Catalog: A Galaxy Catalog Based on New Public Surveys*”
- Bodaghee, A., Tomsick, J. A., Rodriguez, J., & James, J. B. 2012, ApJ, 744, 108, “*Clustering between High-mass X-Ray Binaries and OB Associations in the Milky Way*”
- Bonnarel, F., et al. 2000, A&AS, 143, 33, “*The ALADIN interactive sky atlas. A reference tool for identification of astronomical sources*”

- Borne, K. 2009, ArXiv e-prints, arXiv:0911.0505, “*Scientific Data Mining in Astronomy*”
- Borne, K., et al. 2009, in astro2010: The Astronomy and Astrophysics Decadal Survey, ArXiv Astrophysics e-prints, “*Astroinformatics: A 21st Century Approach to Astronomy*”
- Bowyer, S., Byram, E. T., Chubb, T. A., & Friedman, H. 1965, *Science*, 147, 394, “*Cosmic X-ray Sources*”
- Bradshaw, C. F., Fomalont, E. B., & Geldzahler, B. J. 1999, *ApJ*, 512, L121, “*High-Resolution Parallax Measurements of Scorpius X-1*”
- Brandt, S., et al. 2007, *The Astronomer’s Telegram*, 1228, 1, “*A new outburst of the recurrent neutron star transient SAX J1747.0-2853*”
- Breton, R. P., Roberts, M. S. E., Ransom, S. M., Kaspi, V. M., Durant, M., Bergeron, P., & Faulkner, A. J. 2007, *ApJ*, 661, 1073, “*The Unusual Binary Pulsar PSR J1744-3922: Radio Flux Variability, Near-Infrared Observation, and Evolution*”
- Brinchmann, J., Charlot, S., White, S. D. M., Tremonti, C., Kauffmann, G., Heckman, T., & Brinkmann, J. 2004, *MNRAS*, 351, 1151, “*The physical properties of star-forming galaxies in the low-redshift Universe*”
- Brown, W. R., Geller, M. J., Kenyon, S. J., & Kurtz, M. J. 2005, *ApJ*, 622, L33, “*Discovery of an Unbound Hypervelocity Star in the Milky Way Halo*”
- Bruzual, G. & Charlot, S. 2003, *MNRAS*, 344, 1000, “*Stellar population synthesis at the resolution of 2003*”
- Buccheri, R., et al. 1983, *A&A*, 128, 245, “*Search for pulsed gamma-ray emission from radio pulsars in the COS-B data*”
- Budavári, T., et al. 2009, *ApJ*, 694, 1281, “*GALEX-SDSS Catalogs for Statistical Studies*”
- Budavári, T. & Szalay, A. S. 2008, *ApJ*, 679, 301, “*Probabilistic Cross-Identification of Astronomical Sources*”
- Burderi, L., Riggio, A., di Salvo, T., Papitto, A., Menna, M. T., D’Aì, A., & Iaria, R. 2009, *A&A*, 496, L17, “*Timing of the 2008 outburst of SAX J1808.4-3658 with XMM-Newton: a stable orbital-period derivative over ten years*”
- Caldwell, N., Schiavon, R., Morrison, H., Rose, J. A., & Harding, P. 2011, *AJ*, 141, 61, “*Star Clusters in M31. II. Old Cluster Metallicities and Ages from Hectospec Data*”
- Caldwell, N., Strader, J., Romanowsky, A. J., Brodie, J. P., Moore, B., Diemand, J., & Martizzi, D. 2014, *ApJ*, 787, L11, “*A Globular Cluster toward M87 with a Radial Velocity $< -1000 \text{ km s}^{-1}$: The First Hypervelocity Cluster*”
- Campana, S., Chenevez, J., & Kuulkers, E. 2009, *The Astronomer’s Telegram*, 1951, 1, “*Swift and INTEGRAL observations of SAX J1747.0-2853*”
- Campana, S., Stella, L., Mereghetti, S., & Colpi, M. 1995, *A&A*, 297, 385, “*Radio pulsar and accretion regimes of rapidly rotating magnetic neutron stars in early-type eccentric binaries.*”
- Cappellari, M., et al. 2006, *MNRAS*, 366, 1126, “*The SAURON project - IV. The mass-to-light ratio, the virial mass estimator and the Fundamental Plane of elliptical and lenticular galaxies*”
- Cardelli, J. A., Clayton, G. C., & Mathis, J. S. 1989, *ApJ*, 345, 245, “*The relationship between infrared, optical, and ultraviolet extinction*”
- Carlberg, R. G., Yee, H. K. C., & Ellingson, E. 1997, *ApJ*, 478, 462, “*The Average Mass and Light Profiles of Galaxy Clusters*”
- Casares, J., González Hernández, J. I., Israelian, G., & Rebolo, R. 2010, *MNRAS*, 401, 2517, “*On the mass of the neutron star in Cyg X-2*”
- Castelli, F. & Kurucz, R. L. 2004, ArXiv Astrophysics e-prints, arXiv:astro, “*New Grids of ATLAS9 Model Atmospheres*”
- Cavecchi, Y., et al. 2011, *ApJ*, 740, L8, “*Implications of Burst Oscillations from the Slowly Rotating Accreting Pulsar IGR J17480-2446 in the Globular Cluster Terzan 5*”
- Chakrabarty, D., et al. 1997, *ApJ*, 474, 414, “*Torque Reversal and Spin-down of the Accretion-powered Pulsar 4U 1626-67*”

- Charles, P. A. & Naylor, T. 1992, MNRAS, 255, 6P, “*Infrared observations of low-mass X-ray binaries. II - Discovery of a variable infrared counterpart to GX13 + 1*”
- Chaty, S. & Rahoui, F. 2012, ApJ, 751, 150, “*Broadband ESO/VISIR-Spitzer Infrared Spectroscopy of the Obscured Supergiant X-Ray Binary IGR J16318-4848*”
- Chaty, S., Rahoui, F., Foellmi, C., Tomsick, J. A., Rodriguez, J., & Walter, R. 2008, A&A, 484, 783, “*Multi-wavelength observations of Galactic hard X-ray sources discovered by INTEGRAL. I. The nature of the companion star*”
- Chelovekov, I. V. & Grebenev, S. A. 2007, Astronomy Letters, 33, 807, “*Detection of the first thermonuclear X-ray burst from AX J1754.2-2754*”
- Chenevez, J., et al. 2006a, A&A, 449, L5, “*Two-phase X-ray burst from GX 3+1 observed by INTEGRAL*”
- Chenevez, J., et al. 2006b, The Astronomer’s Telegram, 734, 1, “*Three active neutron star X-ray transients: SAX J1747.0-2853, XTE J1739-285 and GRS 1747-312*”
- Chilingarian, I. 2010, Докторская диссертация, ed. Chilingarian, I., Докторская диссертация
- Chilingarian, I., Cayatte, V., Revaz, Y., Dodonov, S., Durand, D., Durret, F., Micol, A., & Slezak, E. 2009a, Science, 326, 1379, “*A Population of Compact Elliptical Galaxies Detected with the Virtual Observatory*”
- Chilingarian, I., Prugniel, P., Sil’chenko, O., & Koleva, M. 2007a, in IAU Symposium, Vol. 241, Stellar Populations as Building Blocks of Galaxies, ed. A. Vazdekis & R. R. Peletier (Cambridge, UK: Cambridge University Press), 175–176, arXiv:0709.3047, “*NBursts: Simultaneous Extraction of Internal Kinematics and Parametrized SFH from Integrated Light Spectra*”
- Chilingarian, I. & Zolotukhin, I. 2015, Science, 348, 418, “*Isolated compact elliptical galaxies: Stellar systems that ran away*”
- Chilingarian, I., Zolotukhin, I., Katkov, I., Melchior, A.-L., Rubtsov, E., & Grishin, K. 2016, ArXiv e-prints, arXiv:1612.02047, “*RCSED - A Value-Added Reference Catalog of Spectral Energy Distributions of 800,299 Galaxies in 11 Ultraviolet, Optical, and Near-Infrared Bands: Morphologies, Colors, Ionized Gas and Stellar Populations Properties*”
- Chilingarian, I. V. 2009, MNRAS, 394, 1229, “*Evolution of dwarf early-type galaxies - I. Spatially resolved stellar populations and internal kinematics of Virgo cluster dE/dS0 galaxies*”
- Chilingarian, I. V. & Bergond, G. 2010, MNRAS, 405, L11, “*SDSS J150634.27+013331.6: the second compact elliptical galaxy in the NGC 5846 group*”
- Chilingarian, I. V., Cayatte, V., Durret, F., Adami, C., Balkowski, C., Chemin, L., Laganá, T. F., & Prugniel, P. 2008, A&A, 486, 85, “*Kinematics and stellar populations of low-luminosity early-type galaxies in the Abell 496 cluster*”
- Chilingarian, I. V., De Rijcke, S., & Buyle, P. 2009b, ApJ, 697, L111, “*Internal Kinematics and Stellar Populations of the Poststarburst Galaxy SDSS J230743.41+152558.4*”
- Chilingarian, I. V., Melchior, A., & Zolotukhin, I. Y. 2010, MNRAS, 405, 1409, “*Analytical approximations of K-corrections in optical and near-infrared bands*”
- Chilingarian, I. V., Mieske, S., Hilker, M., & Infante, L. 2011, MNRAS, 412, 1627, “*Dynamical versus stellar masses of ultracompact dwarf galaxies in the Fornax cluster*”
- Chilingarian, I. V., Novikova, A. P., Cayatte, V., Combes, F., Di Matteo, P., & Zasov, A. V. 2009c, A&A, 504, 389, “*NGC 6340: an old S0 galaxy with a young polar disc. Clues from morphology, internal kinematics, and stellar populations*”
- Chilingarian, I. V., Prugniel, P., Sil’chenko, O. K., & Afanasiev, V. L. 2007b, MNRAS, 376, 1033, “*Kinematics and stellar populations of the dwarf elliptical galaxy IC 3653*”
- Chilingarian, I. V. & Zolotukhin, I. Y. 2012, MNRAS, 419, 1727, “*A universal ultraviolet-optical colour-colour-magnitude relation of galaxies*”
- Churchwell, E., et al. 2009, PASP, 121, 213, “*The Spitzer/GLIMPSE Surveys: A New View of the Milky Way*”

- Cid Fernandes, R., Stasińska, G., Schlickmann, M. S., Mateus, A., Vale Asari, N., Schoenell, W., & Sodré, L. 2010, MNRAS, 403, 1036, “*Alternative diagnostic diagrams and the ‘forgotten’ population of weak line galaxies in the SDSS*”
- Code, A. D. 1969, PASP, 81, 475, “*Photoelectric Photometry from a Space Vehicle*”
- Cohn, H. N., Lugger, P. M., Grindlay, J. E., & Edmonds, P. D. 2002, ApJ, 571, 818, “*Hubble Space Telescope/NICMOS Observations of Terzan 5: Stellar Content and Structure of the Core*”
- Cole, S., Lacey, C. G., Baugh, C. M., & Frenk, C. S. 2000, MNRAS, 319, 168, “*Hierarchical galaxy formation*”
- Coleiro, A. & Chaty, S. 2013, ApJ, 764, 185, “*Distribution of High-mass X-Ray Binaries in the Milky Way*”
- Colless, M., et al. 2001, MNRAS, 328, 1039, “*The 2dF Galaxy Redshift Survey: spectra and redshifts*”
- Comastri, A., et al. 2002, ApJ, 571, 771, “*The HELLAS2XMM Survey. II. Multiwavelength Observations of P3: An X-Ray-bright, Optically Inactive Galaxy*”
- Corbel, S. & Fender, R. P. 2002, ApJ, 573, L35, “*Near-Infrared Synchrotron Emission from the Compact Jet of GX 339-4*”
- Cutri, R. M., et al. 2011, “*Explanatory Supplement to the WISE Preliminary Data Release Products*”, Tech. rep.
- D’Abrusco, R., Staiano, A., Longo, G., Brescia, M., Paolillo, M., De Filippis, E., & Tagliaferri, R. 2007, ApJ, 663, 752, “*Mining the SDSS Archive. I. Photometric Redshifts in the Nearby Universe*”
- Dadina, M., Masetti, N., Cappi, M., Malaguti, G., Miniutti, G., Ponti, G., Gandhi, P., & De Marco, B. 2013, A&A, 559, A86, “*Ultraluminous X-ray source XMMUJ132218.3-164247 is in fact a type I Quasar*”
- D’Amico, F., Heindl, W. A., Rothschild, R. E., & Gruber, D. E. 2001, ApJ, 547, L147, “*High-Energy X-Ray Timing Experiment Detections of Hard X-Ray Tails in Scorpius X-1*”
- Damjanov, I., Chilingarian, I., Hwang, H. S., & Geller, M. J. 2013, ApJ, 775, L48, “*Discovery of Nine Intermediate-redshift Compact Quiescent Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey*”
- Damjanov, I., Hwang, H. S., Geller, M. J., & Chilingarian, I. 2014, ApJ, 793, 39, “*The Number Density of Quiescent Compact Galaxies at Intermediate Redshift*”
- Davis, S. W., Narayan, R., Zhu, Y., Barret, D., Farrell, S. A., Godet, O., Servillat, M., & Webb, N. A. 2011, ApJ, 734, 111, “*The Cool Accretion Disk in ESO 243-49 HLX-1: Further Evidence of an Intermediate-mass Black Hole*”
- de Jong, J. A., van Paradijs, J., & Augusteijn, T. 1996, A&A, 314, 484, “*Reprocessing of X rays in low-mass X-ray binaries.*”
- De Lucia, G. & Blaizot, J. 2007, MNRAS, 375, 2, “*The hierarchical formation of the brightest cluster galaxies*”
- de Vaucouleurs, G., de Vaucouleurs, A., Corwin, Jr., H. G., Buta, R. J., Paturel, G., & Fouqué, P. 1991, Third Reference Catalogue of Bright Galaxies. Volume I: Explanations and references. Volume II: Data for galaxies between 0^h and 12^h . Volume III: Data for galaxies between 12^h and 24^h . Third Reference Catalogue of Bright Galaxies. Volume I: Explanations and references. Volume II: Data for galaxies between 0^h and 12^h . Volume III: Data for galaxies between 12^h and 24^h .
- Deacon, N. R., Hambly, N. C., King, R. R., & McCaughrean, M. J. 2009, MNRAS, 394, 857, “*The UKIDSS-2MASS proper motion survey - I. Ultracool dwarfs from UKIDSS DR4*”
- Del Santo, M., Sidoli, L., Mereghetti, S., Bazzano, A., Tarana, A., & Ubertini, P. 2007, A&A, 468, L17, “*XMMU J174716.1-281048: a ‘quasi-persistent’ very faint X-ray transient?*”
- den Hartog, P. R., et al. 2003, A&A, 400, 633, “*Burst-properties as a function of mass accretion rate in GX 3+1*”
- Denisenko, D. V. & Sokolovsky, K. V. 2011, Astronomy Letters, 37, 91, “*Identification of new cataclysmic variables in the 1RXS and USNO-B1.0 catalogs*”
- Diaferio, A. 1999, MNRAS, 309, 610, “*Mass estimation in the outer regions of galaxy clusters*”
- Diaferio, A. & Geller, M. J. 1997, ApJ, 481, 633, “*Infall Regions of Galaxy Clusters*”

- Dickey, J. M. & Lockman, F. J. 1990, ARA&A, 28, 215, “*H I in the Galaxy*”
- Djorgovski, S. & Davis, M. 1987, ApJ, 313, 59, “*Fundamental properties of elliptical galaxies*”
- Djorgovski, S. & King, I. R. 1986, ApJ, 305, L61, “*A preliminary survey of collapsed cores in globular clusters*”
- Dopita, M. A., Kewley, L. J., Sutherland, R. S., & Nicholls, D. C. 2016, Ap&SS, 361, 61, “*Chemical abundances in high-redshift galaxies: a powerful new emission line diagnostic*”
- Dopita, M. A., Sutherland, R. S., Nicholls, D. C., Kewley, L. J., & Vogt, F. P. A. 2013, ApJS, 208, 10, “*New Strong-line Abundance Diagnostics for H II Regions: Effects of κ -distributed Electron Energies and New Atomic Data*”
- Dowler, P., Rixon, G., & Tody, D. 2011, ArXiv e-prints, arXiv:1110.0497, “*IVOA Recommendation: Table Access Protocol Version 1.0*”
- Dressler, A. & Gunn, J. E. 1983, ApJ, 270, 7, “*Spectroscopy of galaxies in distant clusters. II - The population of the 3C 295 cluster*”
- Drew, J. E., et al. 2005, MNRAS, 362, 753, “*The INT Photometric H α Survey of the Northern Galactic Plane (IPHAS)*”
- Drinkwater, M. J., Gregg, M. D., Hilker, M., Bekki, K., Couch, W. J., Ferguson, H. C., Jones, J. B., & Phillipps, S. 2003, Nature, 423, 519, “*A class of compact dwarf galaxies from disruptive processes in galaxy clusters*”
- Dubus, G., Hameury, J.-M., & Lasota, J.-P. 2001, A&A, 373, 251, “*The disc instability model for X-ray transients: Evidence for truncation and irradiation*”
- Dubus, G., Lasota, J.-P., Hameury, J.-M., & Charles, P. 1999, MNRAS, 303, 139, “*X-ray irradiation in low-mass binary systems*”
- Dutra, C. M., Bica, E., Soares, J., & Barbuy, B. 2003, A&A, 400, 533, “*New infrared star clusters in the southern Milky Way with 2MASS*”
- Eggleton, P. P. 1983, ApJ, 268, 368, “*Approximations to the radii of Roche lobes*”
- Eisenstein, D. J., et al. 2001, AJ, 122, 2267, “*Spectroscopic Target Selection for the Sloan Digital Sky Survey: The Luminous Red Galaxy Sample*”
- Ekers, R. D. 2010, ArXiv e-prints, arXiv:1004.4279, “*Big and Small*”
- Elvis, M., et al. 2009, ApJS, 184, 158, “*The Chandra COSMOS Survey. I. Overview and Point Source Catalog*”
- Esposito, P., et al. 2016, MNRAS, 457, L5, “*EXTrAS discovery of an 1.2-s X-ray pulsar in M 31*”
- Evans, I. N., et al. 2010, ApJS, 189, 37, “*The Chandra Source Catalog*”
- Evans, P. A., et al. 2014, ApJS, 210, 8, “*ISXPS: A Deep Swift X-Ray Telescope Point Source Catalog with Light Curves and Spectra*”
- Fabbiano, G. 2006, ARA&A, 44, 323, “*Populations of X-Ray Sources in Galaxies*”
- Faber, S. M. 1973, ApJ, 179, 423, “*Tidal Origin of Elliptical Galaxies of High Surface Brightness*”
- Faber, S. M. & Jackson, R. E. 1976, ApJ, 204, 668, “*Velocity dispersions and mass-to-light ratios for elliptical galaxies*”
- Fabian, A. C., Pringle, J. E., & Rees, M. J. 1975, MNRAS, 172, 15, “*Tidal capture formation of binary systems and X-ray sources in globular clusters*”
- Fabricant, D., Chilingarian, I., Hwang, H. S., Kurtz, M. J., Geller, M. J., Del’Antonio, I. P., & Rines, K. J. 2013, PASP, 125, 1362, “*Measuring Galaxy Velocity Dispersions with Hectospec*”
- Fabricant, D., et al. 2005, PASP, 117, 1411, “*Hectospec, the MMT’s 300 Optical Fiber-Fed Spectrograph*”
- Fakhouri, O., Ma, C.-P., & Boylan-Kolchin, M. 2010, MNRAS, 406, 2267, “*The merger rates and mass assembly histories of dark matter haloes in the two Millennium simulations*”
- Farrell, S. A., et al. 2012, ApJ, 747, L13, “*A Young Massive Stellar Population around the Intermediate-mass Black Hole ESO 243-49 HLX-1*”

- Farrell, S. A., Webb, N. A., Barret, D., Godet, O., & Rodrigues, J. M. 2009, *Nature*, 460, 73, “*An intermediate-mass black hole of over 500 solar masses in the galaxy ESO243-49*”
- Faucher-Giguère, C.-A. & Kaspi, V. M. 2006, *ApJ*, 643, 332, “*Birth and Evolution of Isolated Radio Pulsars*”
- Fazio, G. G., et al. 2004, *ApJS*, 154, 10, “*The Infrared Array Camera (IRAC) for the Spitzer Space Telescope*”
- Ferraro, F. R., et al. 2009, *Nature*, 462, 1028, “*Two distinct sequences of blue straggler stars in the globular cluster M 30*”
- Fienga, A. & Andrei, A. H. 2004, *A&A*, 420, 1163, “*Northern Hemisphere observations of ICRF sources on the USNO stellar catalogue frame*”
- Fioc, M. & Rocca-Volmerange, B. 1997, *A&A*, 326, 950, “*PEGASE: a UV to NIR spectral evolution model of galaxies. Application to the calibration of bright galaxy counts.*”
- Forman, W., Jones, C., Cominsky, L., Julien, P., Murray, S., Peters, G., Tananbaum, H., & Giacconi, R. 1978, *ApJS*, 38, 357, “*The fourth Uhuru catalog of X-ray sources.*”
- Fryer, C. L. & Kalogera, V. 2001, *ApJ*, 554, 548, “*Theoretical Black Hole Mass Distributions*”
- Fukugita, M., et al. 2007, *AJ*, 134, 579, “*A Catalog of Morphologically Classified Galaxies from the Sloan Digital Sky Survey: North Equatorial Region*”
- Fukugita, M., Shimasaku, K., & Ichikawa, T. 1995, *PASP*, 107, 945, “*Galaxy Colors in Various Photometric Band Systems*”
- Fürst, F., et al. 2016, *ApJ*, 831, L14, “*Discovery of Coherent Pulsations from the Ultraluminous X-Ray Source NGC 7793 P13*”
- Gabriel, C., et al. 2004, in *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, Vol. 314, *Astronomical Data Analysis Software and Systems (ADASS) XIII*, ed. F. Ochsenbein, M. G. Allen, & D. Egret, 759, “*The XMM-Newton SAS - Distributed Development and Maintenance of a Large Science Analysis System: A Critical Analysis*”
- Gallazzi, A., Charlot, S., Brinchmann, J., & White, S. D. M. 2006, *MNRAS*, 370, 1106, “*Ages and metallicities of early-type galaxies in the Sloan Digital Sky Survey: new insight into the physical origin of the colour-magnitude and the $Mg_2-\sigma_V$ relations*”
- Galleti, S., Federici, L., Bellazzini, M., Fusi Pecci, F., & Macrina, S. 2004, *A&A*, 416, 917, “*2MASS NIR photometry for 693 candidate globular clusters in M 31 and the Revised Bologna Catalogue*”
- Galloway, D. K., Munro, M. P., Hartman, J. M., Psaltis, D., & Chakrabarty, D. 2008, *ApJS*, 179, 360, “*Thermonuclear (Type I) X-Ray Bursts Observed by the Rossi X-Ray Timing Explorer*”
- Geha, M., Blanton, M. R., Yan, R., & Tinker, J. L. 2012, *ApJ*, 757, 85, “*A Stellar Mass Threshold for Quenching of Field Galaxies*”
- Geminale, A. & Popowski, P. 2004, *AcA*, 54, 375, “*Total to Selective Extinction Ratios and Visual Extinctions from Ultraviolet Data*”
- Georgakakis, A., Nandra, K., Laird, E. S., Aird, J., & Trichas, M. 2008, *MNRAS*, 388, 1205, “*A new method for determining the sensitivity of X-ray imaging observations and the X-ray number counts*”
- Ghosh, P. & Lamb, F. K. 1978, *ApJ*, 223, L83, “*Disk accretion by magnetic neutron stars*”
- Giacconi, R., Gursky, H., Paolini, F. R., & Rossi, B. B. 1962, *Physical Review Letters*, 9, 439, “*Evidence for x Rays From Sources Outside the Solar System*”
- Gilfanov, M. 2004, *MNRAS*, 349, 146, “*Low-mass X-ray binaries as a stellar mass indicator for the host galaxy*”
- Gioia, I. M., Maccacaro, T., Schild, R. E., Wolter, A., Stocke, J. T., Morris, S. L., & Henry, J. P. 1990, *ApJS*, 72, 567, “*The Einstein Observatory Extended Medium-Sensitivity Survey. I - X-ray data and analysis*”
- Glushkova, E. V., Kopusov, S. E., Zolotukhin, I. Y., Beletsky, Y. V., Vlasov, A. D., & Leonova, S. I. 2010, *Astronomy Letters*, 36, 75, “*Automated search for star clusters in large multiband surveys: II. Discovery and investigation of open clusters in the galactic plane*”

- Gnedin, O. Y., Zhao, H., Pringle, J. E., Fall, S. M., Livio, M., & Meylan, G. 2002, ApJ, 568, L23, “*The Unique History of the Globular Cluster ω Centauri*”
- Godet, O., Barret, D., Webb, N. A., Farrell, S. A., & Gehrels, N. 2009, ApJ, 705, L109, “*First Evidence for Spectral State Transitions in the ESO 243-49 Hyperluminous X-Ray Source HLX-1*”
- Godet, O., Lombardi, J. C., Antonini, F., Barret, D., Webb, N. A., Vingless, J., & Thomas, M. 2014, ApJ, 793, 105, “*Implications of the Delayed 2013 Outburst of ESO 243-49 HLX-1*”
- Godet, O., et al. 2012, ApJ, 752, 34, “*Investigating Slim Disk Solutions for HLX-1 in ESO 243-49*”
- González-Martín, O. & Vaughan, S. 2012, A&A, 544, A80, “*X-ray variability of 104 active galactic nuclei. XMM-Newton power-spectrum density profiles*”
- Goto, T. 2007, MNRAS, 381, 187, “*A catalogue of local E+A (post-starburst) galaxies selected from the Sloan Digital Sky Survey Data Release 5*”
- Graham, A. W. 2012, ApJ, 746, 113, “*Breaking the Law: The M_{bh} - $M_{spheroid}$ Relations for Core-Sérsic and Sérsic Galaxies*”
- Greene, J. E. & Ho, L. C. 2004, ApJ, 610, 722, “*Active Galactic Nuclei with Candidate Intermediate-Mass Black Holes*”
- Greene, J. E. & Ho, L. C. 2005, ApJ, 630, 122, “*Estimating Black Hole Masses in Active Galaxies Using the H α Emission Line*”
- Greene, J. E. & Ho, L. C. 2007, ApJ, 670, 92, “*A New Sample of Low-Mass Black Holes in Active Galaxies*”
- Grimm, H.-J., Gilfanov, M., & Sunyaev, R. 2002, A&A, 391, 923, “*The Milky Way in X-rays for an outside observer. Log(N)-Log(S) and luminosity function of X-ray binaries from RXTE/ASM data*”
- Grimm, H.-J., Gilfanov, M., & Sunyaev, R. 2003, MNRAS, 339, 793, “*High-mass X-ray binaries as a star formation rate indicator in distant galaxies*”
- Groves, B., Brinchmann, J., & Walcher, C. J. 2012, MNRAS, 419, 1402, “*The Balmer decrement of Sloan Digital Sky Survey galaxies*”
- Gunn, J. E. & Gott, J. R. I. 1972, ApJ, 176, 1, “*On the Infall of Matter Into Clusters of Galaxies and Some Effects on Their Evolution*”
- Haberl, F., et al. 2016, ArXiv e-prints, arXiv:1610.00904, “*EXTraS discovery of two pulsators in the direction of the LMC: a Be/X-ray binary pulsar in the LMC and a candidate double-degenerate polar in the foreground*”
- Haines, C. P., Gargiulo, A., & Merluzzi, P. 2008, MNRAS, 385, 1201, “*The SDSS-GALEX viewpoint of the truncated red sequence in field environments at $z \sim 0$* ”
- Hakala, P. J., Charles, P. A., & Muhli, P. 2011, MNRAS, 416, 644, “*Fast optical and X-ray variability in the UCXB 4U0614+09*”
- Harris, W. E. 1996, AJ, 112, 1487, “*A Catalog of Parameters for Globular Clusters in the Milky Way*”
- Heger, A., Fryer, C. L., Woosley, S. E., Langer, N., & Hartmann, D. H. 2003, ApJ, 591, 288, “*How Massive Single Stars End Their Life*”
- Heida, M., Jonker, P. G., & Torres, M. A. P. 2015, MNRAS, 454, L26, “*Discovery of a second outbursting hyperluminous X-ray source*”
- Heida, M., et al. 2014, MNRAS, 442, 1054, “*Near-infrared counterparts of ultraluminous X-ray sources*”
- Heida, M., Jonker, P. G., Torres, M. A. P., Roberts, T. P., Miniutti, G., Fabian, A. C., & Ratti, E. M. 2013, MNRAS, 433, 681, “*VLT/FORS2 observations of four high-luminosity ULX candidates*”
- Heinke, C. O., Wijnands, R., Cohn, H. N., Lugger, P. M., Grindlay, J. E., Pooley, D., & Lewin, W. H. G. 2006, ApJ, 651, 1098, “*Faint X-Ray Sources in the Globular Cluster Terzan 5*”
- Hellier, C. 1999, ApJ, 519, 324, “*Doppler Tomography of Intermediate Polar Spin Cycles*”

- Hénon, M. 1961, *Annales d'Astrophysique*, 24, 369, “*Sur l'évolution dynamique des amas globulaires*”
- Hernquist, L. 1990, *ApJ*, 356, 359, “*An analytical model for spherical galaxies and bulges*”
- Hertz, P. & Grindlay, J. E. 1984, *ApJ*, 282, 118, “*Infrared observations of galactic bulge X-ray sources*”
- Hewett, P. C., Warren, S. J., Leggett, S. K., & Hodgkin, S. T. 2006, *MNRAS*, 367, 454, “*The UKIRT Infrared Deep Sky Survey ZY JHK photometric system: passbands and synthetic colours*”
- Hinshaw, G., et al. 2013, *ApJS*, 208, 19, “*Nine-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Cosmological Parameter Results*”
- Hogg, D. W., Baldry, I. K., Blanton, M. R., & Eisenstein, D. J. 2002, *ArXiv Astrophysics e-prints*, arXiv:astro-ph/0210394, “*The K correction*”
- Homan, J., Buxton, M., Markoff, S., Bailyn, C. D., Nespoli, E., & Belloni, T. 2005, *ApJ*, 624, 295, “*Multiwavelength Observations of the 2002 Outburst of GX 339-4: Two Patterns of X-Ray-Optical/Near-Infrared Behavior*”
- Howell, S. B., Nelson, L. A., & Rappaport, S. 2001, *ApJ*, 550, 897, “*An Exploration of the Paradigm for the 2-3 Hour Period Gap in Cataclysmic Variables*”
- Hut, P., et al. 1992, *PASP*, 104, 981, “*Binaries in globular clusters*”
- Huxor, A. P., Phillipps, S., & Price, J. 2013, *MNRAS*, 430, 1956, “*Discovery of an isolated compact elliptical galaxy in the field*”
- Huxor, A. P., Phillipps, S., Price, J., & Harniman, R. 2011, *MNRAS*, 414, 3557, “*Tidal streams in newly discovered M32 analogues: evidence for the stripping scenario*”
- Hynes, R. I., Charles, P. A., van Zyl, L., Barnes, A., Steeghs, D., O'Brien, K., & Casares, J. 2004, *MNRAS*, 348, 100, “*Spectroscopy of the optical counterpart to Ser X-1*”
- Ilbert, O., et al. 2006, *A&A*, 457, 841, “*Accurate photometric redshifts for the CFHT legacy survey calibrated using the VIMOS VLT deep survey*”
- Illarionov, A. F. & Sunyaev, R. A. 1975, *A&A*, 39, 185, “*Why the Number of Galactic X-ray Stars Is so Small?*”
- in 't Zand, J., Bazzano, A., Cocchi, M., Ubertini, P., Muller, J. M., & Torroni, V. 1998, *IAU Circ.*, 6846, 2, “*SAX J1747.0-2853 and GX +0.2-0.2*”
- Irwin, J. A., et al. 2016, *Nature*, 538, 356, “*Ultraluminous X-ray bursts in two ultracompact companions to nearby elliptical galaxies*”
- Israel, G. L., et al. 2016, *ArXiv e-prints*, arXiv:1609.07375, “*ULX-1 in NGC5907: how bright can an accreting pulsar shine?*”
- Ivanova, N., Heinke, C. O., Rasio, F. A., Belczynski, K., & Fregeau, J. M. 2008, *MNRAS*, 386, 553, “*Formation and evolution of compact binaries in globular clusters - II. Binaries with neutron stars*”
- Ivezić, Ž., et al. 2004, *Astronomische Nachrichten*, 325, 583, “*SDSS data management and photometric quality assessment*”
- Jansen, F., et al. 2001, *A&A*, 365, L1, “*XMM-Newton observatory. I. The spacecraft and operations*”
- Jernigan, J. G., Bradt, H. V., Doxsey, R. E., Dower, R. G., McClintock, J. E., & Apparao, K. M. V. 1978, *Nature*, 272, 701, “*Positions of galactic X-ray sources with $l/|b|$ between -20 deg and $+6$ deg*”
- Jimenez-Garate, M. A., Raymond, J. C., & Liedahl, D. A. 2002, *ApJ*, 581, 1297, “*The Structure and X-Ray Recombination Emission of a Centrally Illuminated Accretion Disk Atmosphere and Corona*”
- Jonker, P. G. & Nelemans, G. 2004, *MNRAS*, 354, 355, “*The distances to Galactic low-mass X-ray binaries: consequences for black hole luminosities and kicks*”
- Jordi, K., Grebel, E. K., & Ammon, K. 2006, *A&A*, 460, 339, “*Empirical color transformations between SDSS photometry and other photometric systems*”
- Kaiser, N. 1987, *MNRAS*, 227, 1, “*Clustering in real space and in redshift space*”

- Kauffmann, G., et al. 2003, MNRAS, 341, 33, “*Stellar masses and star formation histories for 10^5 galaxies from the Sloan Digital Sky Survey*”
- Kaur, R., Wijnands, R., Paul, B., Patruno, A., & Degenaar, N. 2010, MNRAS, 402, 2388, “*Near-infrared/optical identification of five low-luminosity X-ray pulsators*”
- Kaviraj, S., et al. 2007, ApJS, 173, 619, “*UV-Optical Colors As Probes of Early-Type Galaxy Evolution*”
- Kawai, N., Fenimore, E. E., Middleditch, J., Cruddace, R. G., Fritz, G. G., Snyder, W. A., & Ulmer, M. P. 1988, ApJ, 330, 130, “*X-ray observations of the Galactic center by SPARTAN 1*”
- Kelson, D. D. 2003, PASP, 115, 688, “*Optimal Techniques in Two-dimensional Spectroscopy: Background Subtraction for the 21st Century*”
- Kewley, L. J. & Ellison, S. L. 2008, ApJ, 681, 1183, “*Metallicity Calibrations and the Mass-Metallicity Relation for Star-forming Galaxies*”
- Kewley, L. J., Groves, B., Kauffmann, G., & Heckman, T. 2006, MNRAS, 372, 961, “*The host galaxies and classification of active galactic nuclei*”
- Khabibullin, I. & Sazonov, S. 2014, MNRAS, 444, 1041, “*Stellar tidal disruption candidates found by cross-correlating the ROSAT Bright Source Catalogue and XMM-Newton observations*”
- Kim, M., et al. 2015, ApJ, 814, 8, “*An Off-nucleus Nonstellar Black Hole in the Seyfert Galaxy NGC 5252*”
- King, A. & Lasota, J.-P. 2016, arXiv, arXiv:1601.03738, “*ULXs: Neutron Stars vs Black Holes*”
- King, I. R. 1966, AJ, 71, 64, “*The structure of star clusters. III. Some simple dynamical models*”
- Kodama, T. & Arimoto, N. 1997, A&A, 320, 41, “*Origin of the colour-magnitude relation of elliptical galaxies.*”
- Kolb, U. 1993, A&A, 271, 149, “*A model for the intrinsic population of cataclysmic variables*”
- Koposov, S. E., Glushkova, E. V., & Zolotukhin, I. Y. 2008, A&A, 486, 771, “*Automated search for Galactic star clusters in large multiband surveys. I. Discovery of 15 new open clusters in the Galactic anticenter region*”
- Kormendy, J. & Ho, L. C. 2013, ARA&A, 51, 511, “*Coevolution (Or Not) of Supermassive Black Holes and Host Galaxies*”
- Krist, J. E., Hook, R. N., & Stoehr, F. 2011, in Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, Vol. 8127, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series, 0, “*20 years of Hubble Space Telescope optical modeling using Tiny Tim*”
- Krivonos, R., Revnivtsev, M., Lutovinov, A., Sazonov, S., Churazov, E., & Sunyaev, R. 2007, A&A, 475, 775, “*INTEGRAL/IBIS all-sky survey in hard X-rays*”
- Krivonos, R., Tsygankov, S., Lutovinov, A., Revnivtsev, M., Churazov, E., & Sunyaev, R. 2012, A&A, 545, A27, “*INTEGRAL/IBIS nine-year Galactic hard X-ray survey*”
- Kroupa, P. 2002, Science, 295, 82, “*The Initial Mass Function of Stars: Evidence for Uniformity in Variable Systems*”
- Kuranov, A. G., Popov, S. B., Postnov, K. A., Volonteri, M., & Perna, R. 2007, MNRAS, 377, 835, “*On the dynamical formation of accreting intermediate mass black holes*”
- Kuulkers, E., den Hartog, P. R., in’t Zand, J. J. M., Verbunt, F. W. M., Harris, W. E., & Cocchi, M. 2003, A&A, 399, 663, “*Photospheric radius expansion X-ray bursts as standard candles*”
- Kuulkers, E., Homan, J., van der Klis, M., Lewin, W. H. G., & Méndez, M. 2002, A&A, 382, 947, “*X-ray bursts at extreme mass accretion rates from GX 17+2*”
- Kuulkers, E., et al. 2010, A&A, 514, A65+, “*What ignites on the neutron star of 4U 0614+091?*”
- Kuulkers, E. & van der Klis, M. 2000, A&A, 356, L45, “*The first radius-expansion X-ray burst from GX 3+1*”
- Landi, R., et al. 2007, The Astronomer’s Telegram, 1273, 1, “*Swift/XRT observations of INTEGRAL sources*”
- Lanzoni, B., et al. 2010, ApJ, 717, 653, “*New Density Profile and Structural Parameters of the Complex Stellar System Terzan 5*”

- Lasota, J.-P. 2001, *NewAR*, 45, 449, “*The disc instability model of dwarf novae and low-mass X-ray binary transients*”
- Lasota, J.-P., Alexander, T., Dubus, G., Barret, D., Farrell, S. A., Gehrels, N., Godet, O., & Webb, N. A. 2011, *ApJ*, 735, 89, “*The Origin of Variability of the Intermediate-mass Black-hole ULX System HLX-1 in ESO 243-49*”
- Lawrence, A., Warren, S. J., Almaini, O., Edge, A. C., Hambly, N. C., Jameson, R. F., Lucas, P., & Casali, M. 2007, *MNRAS*, 379, 1599, “*The UKIRT Infrared Deep Sky Survey (UKIDSS)*”
- Lawson, C. L. & Hanson, R. J. 1995, *Classics in Applied Mathematics*, Vol. 15, *Solving Least Squares Problems*, Solving Least Squares Problems (Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM))
- Le Borgne, D., Rocca-Volmerange, B., Prugniel, P., Lançon, A., Fioc, M., & Soubiran, C. 2004, *A&A*, 425, 881, “*Evolutionary synthesis of galaxies at high spectral resolution with the code PEGASE-HR. Metallicity and age tracers*”
- Leahy, D. A. 1987, *A&A*, 180, 275, “*Searches for pulsed emission - Improved determination of period and amplitude from epoch folding for sinusoidal signals*”
- Leahy, D. A., Darbro, W., Elsner, R. F., Weisskopf, M. C., Kahn, S., Sutherland, P. G., & Grindlay, J. E. 1983, *ApJ*, 266, 160, “*On searches for pulsed emission with application to four globular cluster X-ray sources - NGC 1851, 6441, 6624, and 6712*”
- Lejeune, T., Cuisinier, F., & Buser, R. 1997, *A&AS*, 125, 229, “*Standard stellar library for evolutionary synthesis. I. Calibration of theoretical spectra*”
- Li, F. K., Lewin, W. H. G., Clark, G. W., Doty, J., Hoffman, J. A., & Rappaport, S. A. 1977, *MNRAS*, 179, 21P, “*X-ray bursts from MXB 1837+05*”
- Lin, D., et al. 2016, *ApJ*, 821, 25, “*Discovery of the Candidate Off-nuclear Ultrasoft Hyper-luminous X-Ray Source 3XMM J141711.1+522541*”
- Lin, D., Webb, N. A., & Barret, D. 2012, *ApJ*, 756, 27, “*Classification of X-Ray Sources in the XMM-Newton Serendipitous Source Catalog*”
- Lintott, C., et al. 2011, *MNRAS*, 410, 166, “*Galaxy Zoo 1: data release of morphological classifications for nearly 900 000 galaxies*”
- Lintott, C. J., et al. 2008, *MNRAS*, 389, 1179, “*Galaxy Zoo: morphologies derived from visual inspection of galaxies from the Sloan Digital Sky Survey*”
- Liu, J. 2011, *ApJS*, 192, 10, “*Chandra ACIS Survey of X-ray Point Sources in 383 Nearby Galaxies. I. The Source Catalog*”
- Liu, Q. Z. & Mirabel, I. F. 2005, *A&A*, 429, 1125, “*A catalogue of ultraluminous X-ray sources in external galaxies*”
- Liu, Q. Z., van Paradijs, J., & van den Heuvel, E. P. J. 2007, *A&A*, 469, 807, “*A catalogue of low-mass X-ray binaries in the Galaxy, LMC, and SMC (Fourth edition)*”
- Loewenstein, M. & White, III, R. E. 1999, *ApJ*, 518, 50, “*Prevalence and Properties of Dark Matter in Elliptical Galaxies*”
- London, R., McCray, R., & Auer, L. H. 1981, *ApJ*, 243, 970, “*The structure of X-ray illuminated stellar atmospheres*”
- Longinotti, A. L. 2014, *XMM-Newton Users Handbook*, ed. A. L. Longinotti, *XMM-Newton Users Handbook*
- López-Sánchez, Á. R., Dopita, M. A., Kewley, L. J., Zahid, H. J., Nicholls, D. C., & Scharwächter, J. 2012, *MNRAS*, 426, 2630, “*Eliminating error in the chemical abundance scale for extragalactic H II regions*”
- Lü, G.-L., Zhu, C.-H., Postnov, K. A., Yungelson, L. R., Kuranov, A. G., & Wang, N. 2012, *MNRAS*, 424, 2265, “*Population synthesis for symbiotic X-ray binaries*”
- Lupton, R., Blanton, M. R., Fekete, G., Hogg, D. W., O’Mullane, W., Szalay, A., & Wherry, N. 2004, *PASP*, 116, 133, “*Preparing Red-Green-Blue Images from CCD Data*”
- Lutovinov, A., Revnivtsev, M., Molkov, S., & Sunyaev, R. 2005, *A&A*, 430, 997, “*INTEGRAL observations of five sources in the Galactic Center region*”

- Lutovinov, A. A., Revnivtsev, M. G., Tsygankov, S. S., & Krivonos, R. A. 2013, MNRAS, 431, 327, “Population of persistent high-mass X-ray binaries in the Milky Way”
- Lyne, A. G., Biggs, J. D., Harrison, P. A., & Bailes, M. 1993, Nature, 361, 47, “A long-period globular-cluster pulsar in an eclipsing binary system”
- Lyne, A. G., Manchester, R. N., & D’Amico, N. 1996, ApJ, 460, L41, “PSR B1745-20 and Young Pulsars in Globular Clusters”
- Maccarone, T. J. 2005, MNRAS, 360, L30, “Using radio emission to detect isolated and quiescent accreting black holes”
- Madau, P. & Rees, M. J. 2001, ApJ, 551, L27, “Massive Black Holes as Population III Remnants”
- Madau, P., Rees, M. J., Volonteri, M., Haardt, F., & Oh, S. P. 2004, ApJ, 604, 484, “Early Reionization by Mini-quasars”
- Mamon, G. A. & Lokas, E. L. 2005, MNRAS, 363, 705, “Dark matter in elliptical galaxies - II. Estimating the mass within the virial radius”
- Manchester, R. N., Hobbs, G. B., Teoh, A., & Hobbs, M. 2005, AJ, 129, 1993, “The Australia Telescope National Facility Pulsar Catalogue”
- Maraston, C. 2005, MNRAS, 362, 799, “Evolutionary population synthesis: models, analysis of the ingredients and application to high- z galaxies”
- Maraston, C., Strömbäck, G., Thomas, D., Wake, D. A., & Nichol, R. C. 2009, MNRAS, 394, L107, “Modelling the colour evolution of luminous red galaxies - improvements with empirical stellar spectra”
- Markwardt, C. B. & Swank, J. H. 2003, The Astronomer’s Telegram, 156, 1, “*Igr* J17597-2201 = *XTE* J1759-220”
- Marshall, D. J., Robin, A. C., Reylé, C., Schultheis, M., & Picaud, S. 2006, A&A, 453, 635, “Modelling the Galactic interstellar extinction distribution in three dimensions”
- Martin, D. C., et al. 2005, ApJ, 619, L1, “The Galaxy Evolution Explorer: A Space Ultraviolet Survey Mission”
- Masetti, N., et al. 2004, A&A, 423, 651, “Serpens X-1 observed by INTEGRAL”
- Masetti, N., et al. 2007, A&A, 470, 331, “IGR J16194-2810: a new symbiotic X-ray binary”
- Matković, A. & Guzmán, R. 2005, MNRAS, 362, 289, “Kinematic properties and stellar populations of faint early-type galaxies - I. Velocity dispersion measurements of central Coma galaxies”
- Matteucci, F. 1994, A&A, 288, 57, “Abundance ratios in ellipticals and galaxy formation”
- McClintock, J. E., Canizares, C. R., Cominsky, L., Li, F. K., Lewin, W. H. G., van Paradijs, J., & Grindlay, J. E. 1979, Nature, 279, 47, “A 3-s delay in an optical burst from X-ray burst source MXB1735-44”
- McClintock, J. E., Remillard, R. A., Petro, L. D., Hammerschlag-Hensberge, G., & Proffitt, C. R. 1984, ApJ, 283, 794, “Cygnus X-2 - Neutron star or degenerate dwarf?”
- McNamara, B. J., et al. 2003, AJ, 125, 1437, “The Behavior of the Optical and X-Ray Emission from Scorpius X-1”
- McNamara, B. J., Norwood, J., Harrison, T. E., Holtzman, J., Dukes, R., & Barker, T. 2005, ApJ, 623, 1070, “Monitoring the Mass Accretion Rate in Scorpius X-1 Using the Optical Johnson B Filter”
- Mescheryakov, A. V., Revnivtsev, M. G., & Filippova, E. V. 2011a, Astronomy Letters, 37, 826, “Parameters of irradiated accretion disks from optical and X-ray observations of GS 1826-238”
- Mescheryakov, A. V., Shakura, N. I., & Suleimanov, V. F. 2011b, Astronomy Letters, 37, 311, “Vertical structure of the outer accretion disk in persistent low-mass X-ray binaries”
- Meyer, F. & Meyer-Hofmeister, E. 1981, A&A, 104, L10, “On the Elusive Cause of Cataclysmic Variable Outbursts”
- Michel, F. C. 1987, Nature, 329, 310, “Origin of millisecond pulsars”
- Michielsen, D., et al. 2008, MNRAS, 385, 1374, “The relation between stellar populations, structure and environment for dwarf elliptical galaxies from the MAGPOP-ITP”

- Mieske, S., Infante, L., Hilker, M., Hertling, G., Blakeslee, J. P., Benítez, N., Ford, H., & Zekser, K. 2005, *A&A*, 430, L25, “*Discovery of two M 32 twins in Abell 1689*”
- Migliari, S., et al. 2007, *ApJ*, 671, 706, “*Linking Jet Emission, X-Ray States, and Hard X-Ray Tails in the Neutron Star X-Ray Binary GX 17+2*”
- Migliari, S., et al. 2010, *ApJ*, 710, 117, “*The Complete Spectrum of the Neutron Star X-ray Binary 4U 0614+091*”
- Mignoli, M., et al. 2004, *A&A*, 418, 827, “*The HELLAS2XMM survey. V. Near-Infrared observations of X-ray sources with extreme X/O ratios*”
- Miller, M. C. & Colbert, E. J. M. 2004, *International Journal of Modern Physics D*, 13, 1, “*Intermediate-Mass Black Holes*”
- Miniutti, G., Ponti, G., Dadina, M., Cappi, M., Malaguti, G., Fabian, A. C., & Gandhi, P. 2006, *MNRAS*, 373, L1, “*Have we detected the most luminous ULX so far?*”
- Minniti, D., et al. 2010, *NewA*, 15, 433, “*VISTA Variables in the Via Lactea (VVV): The public ESO near-IR variability survey of the Milky Way*”
- Mobasher, B., et al. 2007, *ApJS*, 172, 117, “*Photometric Redshifts of Galaxies in COSMOS*”
- Molkov, S., Revnivtsev, M., Lutovinov, A., & Sunyaev, R. 2005, *A&A*, 434, 1069, “*INTEGRAL detection of a long powerful burst from SLX 1735-269*”
- Monet, D. G., et al. 2003, *AJ*, 125, 984, “*The USNO-B Catalog*”
- Moretti, A., Campana, S., Lazzati, D., & Tagliaferri, G. 2003, *ApJ*, 588, 696, “*The Resolved Fraction of the Cosmic X-Ray Background*”
- Murray, S. 2006, in *Chandra Proposal*, 2272+, “*Chandra Identification of Compact ASCA Galactic Objects - Part II*”
- Mushtukov, A. A., Suleimanov, V. F., Tsygankov, S. S., & Poutanen, J. 2015, *MNRAS*, 447, 1847, “*The critical accretion luminosity for magnetized neutron stars*”
- Narayan, R., Mahadevan, R., & Quataert, E. 1998, in *Theory of Black Hole Accretion Disks*, ed. M. A. Abramowicz, G. Bjornsson, & J. E. Pringle, 148, “*Advection-dominated accretion around black holes*”
- Narayan, R. & Ostriker, J. P. 1990, *ApJ*, 352, 222, “*Pulsar populations and their evolution*”
- Naylor, T., Charles, P. A., & Longmore, A. J. 1991, *MNRAS*, 252, 203, “*Infrared observations of low-mass X-ray binaries. I - Candidates for bright bulge sources*”
- Nazé, Y. 2009, *A&A*, 506, 1055, “*Hot stars observed by XMM-Newton. I. The catalog and the properties of OB stars*”
- Newman, J. A., et al. 2013, *ApJS*, 208, 5, “*The DEEP2 Galaxy Redshift Survey: Design, Observations, Data Reduction, and Redshifts*”
- Nieppola, E., Tornikoski, M., & Valtaoja, E. 2006, *A&A*, 445, 441, “*Spectral energy distributions of a large sample of BL Lacertae objects*”
- Norris, M. A., et al. 2014, *MNRAS*, 443, 1151, “*The AIMSS Project - I. Bridging the star cluster-galaxy divide*”
- O’Brien, K., Horne, K., Gomer, R. H., Oke, J. B., & van der Klis, M. 2004, *MNRAS*, 350, 587, “*High-speed Keck II and RXTE spectroscopy of Cygnus X-2 - I. Three X-ray components revealed by correlated variability*”
- O’Brien, K., Horne, K., Hynes, R. I., Chen, W., Haswell, C. A., & Still, M. D. 2002, *MNRAS*, 334, 426, “*Echoes in X-ray binaries*”
- Oh, K., Sarzi, M., Schawinski, K., & Yi, S. K. 2011, *ApJS*, 195, 13, “*Improved and Quality-assessed Emission and Absorption Line Measurements in Sloan Digital Sky Survey Galaxies*”
- Oh, K., Yi, S. K., Schawinski, K., Koss, M., Trakhtenbrot, B., & Soto, K. 2015, *ApJS*, 219, 1, “*A New Catalog of Type 1 AGNs and its Implications on the AGN Unified Model*”

- Oke, J. B. & Sandage, A. 1968, ApJ, 154, 21, “Energy Distributions, K Corrections, and the Stebbins-Whitford Effect for Giant Elliptical Galaxies”
- Olausen, S. A. & Kaspi, V. M. 2014, ApJS, 212, 6, “The McGill Magnetar Catalog”
- Orosz, J. A. & Kuulkers, E. 1999, MNRAS, 305, 132, “The optical light curves of Cygnus X-2 (V1341 Cyg) and the mass of its neutron star”
- Osborne, J. P., et al. 2001, A&A, 378, 800, “The central region of M 31 observed with XMM-Newton. II. Variability of the individual sources”
- Paczynski, B. 1967, Acta Astronomica, 17, 287, “Gravitational Waves and the Evolution of Close Binaries”
- Paczynski, B. 1977, ApJ, 216, 822, “A model of accretion disks in close binaries”
- Paczynski, B. & Sienkiewicz, R. 1981, ApJ, 248, L27, “Gravitational radiation and the evolution of cataclysmic binaries”
- Paizis, A., et al. 2006, A&A, 459, 187, “Average hard X-ray emission from NS LMXBs: observational evidence of different spectral states in NS LMXBs”
- Pandey, M., Rao, A. P., Ishwara-Chandra, C. H., Durouchoux, P., & Manchanda, R. K. 2007, A&A, 463, 567, “Low-frequency radio monitoring of microquasars”
- Papitto, A., D’Aì, A., Motta, S., Riggio, A., Burderi, L., di Salvo, T., Belloni, T., & Iaria, R. 2011, A&A, 526, L3, “The spin and orbit of the newly discovered pulsar IGR J17480-2446”
- Patruno, A., Alpar, M. A., van der Klis, M., & van den Heuvel, E. P. J. 2012, ApJ, 752, 33, “The Peculiar Evolutionary History of IGR J17480-2446 in Terzan 5”
- Patruno, A. & Watts, A. L. 2012, ArXiv e-prints, arXiv:1206.2727, “Accreting Millisecond X-Ray Pulsars”
- Paudel, S., Hilker, M., Ree, C. H., & Kim, M. 2016, ApJ, 820, L19, “SDSS J085431.18+173730.5: The First Compact Elliptical Galaxy Hosting an Active Nucleus”
- Paudel, S., Lisker, T., Hansson, K. S. A., & Huxor, A. P. 2014, MNRAS, 443, 446, “An isolated, compact early-type galaxy with a diffuse stellar component: merger origin?”
- Peacock, M. B., Maccarone, T. J., Knigge, C., Kundu, A., Waters, C. Z., Zepf, S. E., & Zurek, D. R. 2010, MNRAS, 402, 803, “The M31 globular cluster system: ugriz and K-band photometry and structural parameters”
- Peng, C. Y., Ho, L. C., Impey, C. D., & Rix, H.-W. 2002, AJ, 124, 266, “Detailed Structural Decomposition of Galaxy Images”
- Perna, R., Bozzo, E., & Stella, L. 2006, ApJ, 639, 363, “On the Spin-up/Spin-down Transitions in Accreting X-Ray Binaries”
- Petrosian, V. 1976, ApJ, 209, L1, “Surface brightness and evolution of galaxies”
- Pettersen, B. R. & Hawley, S. L. 1989, A&A, 217, 187, “A spectroscopic survey of red dwarf flare stars”
- Pfeffer, J. & Baumgardt, H. 2013, MNRAS, 433, 1997, “Ultra-compact dwarf galaxy formation by tidal stripping of nucleated dwarf galaxies”
- Pickles, A. J. 1998, PASP, 110, 863, “A Stellar Spectral Flux Library: 1150-25000 Å”
- Podorvanyuk, N. Y., Chilingarian, I. V., & Katkov, I. Y. 2013, MNRAS, 432, 2632, “A new technique for the determination of the initial mass function in unresolved stellar populations”
- Podsiadlowski, P., Rappaport, S., & Pfahl, E. D. 2002, ApJ, 565, 1107, “Evolutionary Sequences for Low- and Intermediate-Mass X-Ray Binaries”
- Polletta, M., et al. 2007, ApJ, 663, 81, “Spectral Energy Distributions of Hard X-Ray Selected Active Galactic Nuclei in the XMM-Newton Medium Deep Survey”
- Pooley, D., et al. 2003, ApJ, 591, L131, “Dynamical Formation of Close Binary Systems in Globular Clusters”

- Postnov, K. A. & Kuranov, A. G. 2005, *Astronomy Letters*, 31, 7, “*The Luminosity Function of Low-Mass X-ray Binaries in Galaxies*”
- Predehl, P. & Schmitt, J. H. M. M. 1995, *A&A*, 293, 889, “*X-raying the interstellar medium: ROSAT observations of dust scattering halos.*”
- Pretorius, M. L. & Knigge, C. 2012, *MNRAS*, 419, 1442, “*The space density and X-ray luminosity function of non-magnetic cataclysmic variables*”
- Price, J., et al. 2009, *MNRAS*, 397, 1816, “*The HST/ACS Coma Cluster Survey - V. Compact stellar systems in the Coma Cluster*”
- Prugniel, P. & Soubiran, C. 2004, *ArXiv Astrophysics e-prints*, arXiv:astro-ph/0409214, “*New release of the ELODIE library*”
- Prugniel, P., Soubiran, C., Koleva, M., & Le Borgne, D. 2007, *ArXiv Astrophysics e-prints*, astro, “*New release of the ELODIE library: Version 3.1*”
- Radhakrishnan, V. & Srinivasan, G. 1982, *Current Science*, 51, 1096, “*On the origin of the recently discovered ultra-rapid pulsar*”
- Ranalli, P., Comastri, A., & Setti, G. 2003, *A&A*, 399, 39, “*The 2-10 keV luminosity as a Star Formation Rate indicator*”
- Ransom, S. M. 2001, “*New search techniques for Binary Pulsars*”, PhD thesis, Harvard University
- Rappaport, S., Verbunt, F., & Joss, P. C. 1983, *ApJ*, 275, 713, “*A new technique for calculations of binary stellar evolution, with application to magnetic braking*”
- Ratti, E. M., Bassa, C. G., Torres, M. A. P., Kuiper, L., Miller-Jones, J. C. A., & Jonker, P. G. 2010, *MNRAS*, 408, 1866, “*Chandra localization and optical/near-infrared follow-up of Galactic X-ray sources*”
- Reines, A. E., Greene, J. E., & Geha, M. 2013, *ApJ*, 775, 116, “*Dwarf Galaxies with Optical Signatures of Active Massive Black Holes*”
- Revnivtsev, M., Lutovinov, A., Churazov, E., Sazonov, S., Gilfanov, M., Grebenev, S., & Sunyaev, R. 2008, *A&A*, 491, 209, “*Low-mass X-ray binaries in the bulge of the Milky Way*”
- Revnivtsev, M., Postnov, K., Kuranov, A., & Ritter, H. 2011, *A&A*, 526, A94, “*On the nature of the break in the X-ray luminosity function of low-mass X-ray binaries*”
- Revnivtsev, M., Sazonov, S., Churazov, E., Forman, W., Vikhlinin, A., & Sunyaev, R. 2009, *Nature*, 458, 1142, “*Discrete sources as the origin of the Galactic X-ray ridge emission*”
- Revnivtsev, M. G., Kniazev, A., Karasev, D. I., Berdnikov, L., & Barway, S. 2013, *Astronomy Letters*, 39, 523, “*Infrared observations of eight X-ray sources from Galactic plane surveys*”
- Revnivtsev, M. G., Zolotukhin, I. Y., & Meshcheryakov, A. V. 2012, *MNRAS*, 421, 2846, “*Period-luminosity relation for persistent low-mass X-ray binaries in the near-infrared*”
- Rhode, K. L. & Zepf, S. E. 2004, *AJ*, 127, 302, “*The Globular Cluster Systems of the Early-Type Galaxies NGC 3379, NGC 4406, and NGC 4594 and Implications for Galaxy Formation*”
- Rich, R. M., Collins, M. L. M., Black, C. M., Longstaff, F. A., Koch, A., Benson, A., & Reitzel, D. B. 2012, *Nature*, 482, 192, “*A tidally distorted dwarf galaxy near NGC 4449*”
- Richstone, D. O. & Tremaine, S. 1986, *AJ*, 92, 72, “*Measuring mass-to-light ratios of spherical stellar systems by core fitting*”
- Rieke, G. H. & Lebofsky, M. J. 1985, *ApJ*, 288, 618, “*The interstellar extinction law from 1 to 13 microns*”
- Rieke, G. H., et al. 2004, *ApJS*, 154, 25, “*The Multiband Imaging Photometer for Spitzer (MIPS)*”
- Ritter, H. & Kolb, U. 2003, *A&A*, 404, 301, “*Catalogue of cataclysmic binaries, low-mass X-ray binaries and related objects (Seventh edition)*”

- Robitaille, T. P., et al. 2008, *AJ*, 136, 2413, “*Intrinsically Red Sources Observed by Spitzer in the Galactic Midplane*”
- Robitaille, T. P., Whitney, B. A., Indebetouw, R., & Wood, K. 2007, *ApJS*, 169, 328, “*Interpreting Spectral Energy Distributions from Young Stellar Objects. II. Fitting Observed SEDs Using a Large Grid of Precomputed Models*”
- Rose, J. A., Arimoto, N., Caldwell, N., Schiavon, R. P., Vazdekis, A., & Yamada, Y. 2005, *AJ*, 129, 712, “*Radial Age and Metal Abundance Gradients in the Stellar Content of M32*”
- Rosen, S. R., et al. 2016, *A&A*, 590, A1, “*The XMM-Newton serendipitous survey. VII. The third XMM-Newton serendipitous source catalogue*”
- Ruiz, A., Miniutti, G., Panessa, F., & Carrera, F. J. 2010, *A&A*, 515, A99, “*Spectral energy distribution of hyperluminous infrared galaxies*”
- Russeil, D. 2003, *A&A*, 397, 133, “*Star-forming complexes and the spiral structure of our Galaxy*”
- Russell, D. M. & Fender, R. P. 2008, *MNRAS*, 387, 713, “*Polarized infrared emission from X-ray binary jets*”
- Russell, D. M., Fender, R. P., Hynes, R. I., Brocksopp, C., Homan, J., Jonker, P. G., & Buxton, M. M. 2006, *MNRAS*, 371, 1334, “*Global optical/infrared-X-ray correlations in X-ray binaries: quantifying disc and jet contributions*”
- Russell, D. M., Fender, R. P., & Jonker, P. G. 2007, *MNRAS*, 379, 1108, “*Evidence for a jet contribution to the optical/infrared light of neutron star X-ray binaries*”
- Russell, D. M., O’Brien, K., Muñoz-Darias, T., Casella, P., Gandhi, P., & Revnivtsev, M. G. 2012, *A&A*, 539, A53, “*The near-infrared counterpart of 4U 1636-53*”
- Sakano, M., Koyama, K., Murakami, H., Maeda, Y., & Yamauchi, S. 2002, *ApJS*, 138, 19, “*ASCA X-Ray Source Catalog in the Galactic Center Region*”
- Sales, L. V., Navarro, J. F., Abadi, M. G., & Steinmetz, M. 2007, *MNRAS*, 379, 1475, “*Cosmic ménage à trois: the origin of satellite galaxies on extreme orbits*”
- Salim, S., et al. 2005, *ApJ*, 619, L39, “*New Constraints on the Star Formation Histories and Dust Attenuation of Galaxies in the Local Universe from GALEX*”
- Salpeter, E. E. 1955, *ApJ*, 121, 161, “*The Luminosity Function and Stellar Evolution.*”
- Sánchez-Blázquez, P., et al. 2006, *MNRAS*, 371, 703, “*Medium-resolution Isaac Newton Telescope library of empirical spectra*”
- Saulder, C., Mieske, S., Zeilinger, W. W., & Chilingarian, I. 2013, *A&A*, 557, A21, “*Calibrating the fundamental plane with SDSS DR8 data*”
- Saunders, W., et al. 2000, *MNRAS*, 317, 55, “*The PSCz catalogue*”
- Sazonov, S., Revnivtsev, M., Gilfanov, M., Churazov, E., & Sunyaev, R. 2006, *A&A*, 450, 117, “*X-ray luminosity function of faint point sources in the Milky Way*”
- Schechter, P. 1976, *ApJ*, 203, 297, “*An analytic expression for the luminosity function for galaxies.*”
- Schimminovich, D., et al. 2007, *ApJS*, 173, 315, “*The UV-Optical Color Magnitude Diagram. II. Physical Properties and Morphological Evolution On and Off of a Star-forming Sequence*”
- Schlafly, E. F. & Finkbeiner, D. P. 2011, *ApJ*, 737, 103, “*Measuring Reddening with Sloan Digital Sky Survey Stellar Spectra and Recalibrating SFD*”
- Schlegel, D. J., Finkbeiner, D. P., & Davis, M. 1998, *ApJ*, 500, 525, “*Maps of Dust Infrared Emission for Use in Estimation of Reddening and Cosmic Microwave Background Radiation Foregrounds*”
- Schneider, J., Dedieu, C., Le Sidaner, P., Savalle, R., & Zolotukhin, I. 2011, *A&A*, 532, A79, “*Defining and cataloging exoplanets: the exoplanet.eu database*”
- Servillat, M., Farrell, S. A., Lin, D., Godet, O., Barret, D., & Webb, N. A. 2011, *ApJ*, 743, 6, “*X-Ray Variability and Hardness of ESO 243-49 HLX-1: Clear Evidence for Spectral State Transitions*”

- Seth, A. C., et al. 2014, *Nature*, 513, 398, “*A supermassive black hole in an ultra-compact dwarf galaxy*”
- Shahbaz, T., Fender, R. P., Watson, C. A., & O’Brien, K. 2008, *ApJ*, 672, 510, “*The First Polarimetric Signatures of Infrared Jets in X-Ray Binaries*”
- Shaw Greening, L., Barnard, R., Kolb, U., Tonkin, C., & Osborne, J. P. 2009, *A&A*, 495, 733, “*An X-ray spectral survey of the disc of M 31 with XMM-Newton*”
- Sidoli, L. & Mereghetti, S. 2003, *The Astronomer’s Telegram*, 147, 1, “*A New X-Ray Transient Discovered with XMM*”
- Sidoli, L., Mereghetti, S., Israel, G. L., Chiappetti, L., Treves, A., & Orlandini, M. 1999, *ApJ*, 525, 215, “*The Zoo of X-Ray Sources in the Galactic Center Region: Observations with BEPPOSAX*”
- Simard, L., Mendel, J. T., Patton, D. R., Ellison, S. L., & McConnell, A. W. 2011, *ApJS*, 196, 11, “*A Catalog of Bulge+disk Decompositions and Updated Photometry for 1.12 Million Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey*”
- Siunjaev, R. A., et al. 1991, *Advances in Space Research*, 11, 177, “*Imaging of the Galactic center field by Kvant and Granat*”
- Skinner, G. K., Foster, A. J., Willmore, A. P., & Eyles, C. J. 1990, *MNRAS*, 243, 72, “*Localization of one of the Galactic Centre X-ray burst sources*”
- Skinner, G. K., Willmore, A. P., Eyles, C. J., Bertram, D., & Church, M. J. 1987, *Nature*, 330, 544, “*Hard X-ray images of the Galactic centre*”
- Skrutskie, M. F., et al. 2006, *AJ*, 131, 1163, “*The Two Micron All Sky Survey (2MASS)*”
- Smale, A. P. 1998, *ApJ*, 498, L141+, “*A Type I Burst with Radius Expansion Observed from Cygnus X-2 with the Rossi X-Ray Timing Explorer*”
- Smith, R. J., Lucey, J. R., & Hudson, M. J. 2009a, *MNRAS*, 400, 1690, “*Ages and metallicities for quiescent galaxies in the Shapley supercluster: driving parameters of the stellar populations*”
- Smith, R. J., Lucey, J. R., Hudson, M. J., Allanson, S. P., Bridges, T. J., Hornschemeier, A. E., Marzke, R. O., & Miller, N. A. 2009b, *MNRAS*, 392, 1265, “*A spectroscopic survey of dwarf galaxies in the Coma cluster: stellar populations, environment and downsizing*”
- Spitzer, L. 1969, *ApJ*, 158, L139, “*Equipartition and the formation of compact nuclei in spherical stellar systems*”
- Spitzer, L. 1987, *Dynamical evolution of globular clusters*, *Dynamical evolution of globular clusters*
- Spitzer, Jr., L. & Hart, M. H. 1971, *ApJ*, 164, 399, “*Random Gravitational Encounters and the Evolution of Spherical Systems. I. Method*”
- Steehgs, D. & Casares, J. 2002, *ApJ*, 568, 273, “*The Mass Donor of Scorpius X-1 Revealed*”
- Strader, J., Caldwell, N., & Seth, A. C. 2011, *AJ*, 142, 8, “*Star Clusters in M31. V. Internal Dynamical Trends: Some Troublesome, Some Reassuring*”
- Strateva, I., et al. 2001, *AJ*, 122, 1861, “*Color Separation of Galaxy Types in the Sloan Digital Sky Survey Imaging Data*”
- Strauss, M. A., et al. 2002, *AJ*, 124, 1810, “*Spectroscopic Target Selection in the Sloan Digital Sky Survey: The Main Galaxy Sample*”
- Strüder, L., et al. 2001, *A&A*, 365, L18, “*The European Photon Imaging Camera on XMM-Newton: The pn-CCD camera*”
- Sugizaki, M., Mitsuda, K., Kaneda, H., Matsuzaki, K., Yamauchi, S., & Koyama, K. 2001, *ApJS*, 134, 77, “*Faint X-Ray Sources Resolved in the ASCA Galactic Plane Survey and Their Contribution to the Galactic Ridge X-Ray Emission*”
- Supper, R., Hasinger, G., Lewin, W. H. G., Magnier, E. A., van Paradijs, J., Pietsch, W., Read, A. M., & Trümper, J. 2001, *A&A*, 373, 63, “*The second ROSAT PSPC survey of M 31 and the complete ROSAT PSPC source list*”
- Sutton, A. D., Roberts, T. P., Gladstone, J. C., & Walton, D. J. 2015, *MNRAS*, 450, 787, “*The hyperluminous X-ray source candidate in IC 4320: another HLX bites the dust*”

- Sutton, A. D., Roberts, T. P., & Middleton, M. J. 2013, MNRAS, 435, 1758, “*The ultraluminous state revisited: fractional variability and spectral shape as diagnostics of super-Eddington accretion*”
- Sutton, A. D., Roberts, T. P., Walton, D. J., Gladstone, J. C., & Scott, A. E. 2012, MNRAS, 423, 1154, “*The most extreme ultraluminous X-ray sources: evidence for intermediate-mass black holes?*”
- Swank, J. H., Becker, R. H., Pravdo, S. H., & Serlemitsos, P. J. 1976, IAU Circ., 2963, 1, “*X-Ray Bursts*”
- Swartz, D. A., Soria, R., Tennant, A. F., & Yukita, M. 2011, ApJ, 741, 49, “*A Complete Sample of Ultraluminous X-ray Source Host Galaxies*”
- Szalay, A. S., Gray, J., Thakar, A. R., Kunszt, P. Z., Malik, T., Raddick, J., Stoughton, C., & vandenBerg, J. 2002, Microsoft Technical Report MSR-TR-2001-104; arXiv:cs/0202013, “*The SDSS SkyServer: Public Access to the Sloan Digital Sky Server Data*”
- Szkody, P., et al. 2002, AJ, 123, 430, “*Cataclysmic Variables from The Sloan Digital Sky Survey. I. The First Results*”
- Tao, L., Feng, H., Grisé, F., & Kaaret, P. 2011, ApJ, 737, 81, “*Compact Optical Counterparts of Ultraluminous X-Ray Sources*”
- Taylor, J. H. 1992, Philosophical Transactions: Physical Sciences and Engineering, 341, 117, “*Pulsar Timing and Relativistic Gravity*”
- Taylor, M. B. 2005, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 347, Astronomical Data Analysis Software and Systems XIV, ed. P. Shopbell, M. Britton, & R. Ebert, 29–+, “*TOPCAT & STIL: Starlink Table/VOTable Processing Software*”
- Taylor, M. B. 2006, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 351, Astronomical Data Analysis Software and Systems XV, ed. C. Gabriel, C. Arviset, D. Ponz, & S. Enrique, 666–+, “*STILTS - A Package for Command-Line Processing of Tabular Data*”
- Tempel, E., Tago, E., & Liivamägi, L. J. 2012, A&A, 540, A106, “*Groups and clusters of galaxies in the SDSS DR8. Value-added catalogues*”
- Thorstensen, J. R., Bowyer, S., & Charles, P. A. 1980, ApJ, 238, 964, “*The optical counterpart of the X-ray burster Serpens X-1 /4U 1837+04/*”
- Tjemkes, S. A., van Paradijs, J., & Zuiderwijk, E. J. 1986, A&A, 154, 77, “*Optical light curves of massive X-ray binaries*”
- Tomsick, J. A., Chaty, S., Rodriguez, J., Walter, R., & Kaaret, P. 2008, ApJ, 685, 1143, “*Chandra Localizations and Spectra of INTEGRAL Sources in the Galactic Plane*”
- Tomsick, J. A., Chaty, S., Rodriguez, J., Walter, R., & Kaaret, P. 2009, ApJ, 701, 811, “*Chandra Localizations and Spectra of Integral Sources in the Galactic Plane: The Cycle 9 Sample*”
- Tout, C. A., Pols, O. R., Eggleton, P. P., & Han, Z. 1996, MNRAS, 281, 257, “*Zero-age main-sequence radii and luminosities as analytic functions of mass and metallicity*”
- Tremonti, C. A., et al. 2004, ApJ, 613, 898, “*The Origin of the Mass-Metallicity Relation: Insights from 53,000 Star-forming Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey*”
- Trudolyubov, S., Kotov, O., Priedhorsky, W., Cordova, F., & Mason, K. 2005, ApJ, 634, 314, “*XMM-Newton Observations of the M31 Northern Disk: Properties of Selected X-Ray Sources and Unresolved Emission*”
- Trudolyubov, S. & Priedhorsky, W. 2004, ApJ, 616, 821, “*M31 Globular Cluster X-Ray Sources: XMM-Newton and Chandra Results*”
- Trudolyubov, S. P. & Priedhorsky, W. C. 2008, ApJ, 676, 1218, “*XMM-Newton Discovery of 217 s Pulsations in the Brightest Persistent Supersoft X-Ray Source in M31*”
- Turner, M. J. L., et al. 2001, A&A, 365, L27, “*The European Photon Imaging Camera on XMM-Newton: The MOS cameras : The MOS cameras*”
- Tutukov, A. V. & Yungelson, L. R. 1979, Acta Astronomica, 29, 665, “*On the influence of emission of gravitational waves on the evolution of low-mass close binary stars*”

- Udalski, A. 2003, ApJ, 590, 284, “*The Optical Gravitational Lensing Experiment: Is Interstellar Extinction toward the Galactic Center Anomalous?*”
- Ueda, Y., Ishisaki, Y., Takahashi, T., Makishima, K., & Ohashi, T. 2005, ApJS, 161, 185, “*The ASCA Medium Sensitivity Survey (The GIS Catalog Project): Source Catalog II.*”
- van der Klis, M. 1998, Advances in Space Research, 22, 925, “*Kilohertz quasi-periodic oscillations in low-mass x-ray binaries*”
- van Paradijs, J. & McClintock, J. E. 1994, A&A, 290, 133, “*Absolute visual magnitudes of low-mass X-ray binaries.*”
- van Zee, L., Barton, E. J., & Skillman, E. D. 2004, AJ, 128, 2797, “*Stellar Populations of Dwarf Elliptical Galaxies: UBVRI Photometry of Dwarf Elliptical Galaxies in the Virgo Cluster*”
- Vazdekis, A., Sánchez-Blázquez, P., Falcón-Barroso, J., Cenarro, A. J., Beasley, M. A., Cardiel, N., Gorgas, J., & Peletier, R. F. 2010, MNRAS, 404, 1639, “*Evolutionary stellar population synthesis with MILES - I. The base models and a new line index system*”
- Verbunt, F. 2003, in Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol. 296, New Horizons in Globular Cluster Astronomy, ed. G. Piotto, G. Meylan, S. G. Djorgovski, & M. Riello, 245, “*Binary Evolution and Neutron Stars in Globular Clusters*”
- Verbunt, F. & Freire, P. C. C. 2014, A&A, 561, A11, “*On the disruption of pulsar and X-ray binaries in globular clusters*”
- Verbunt, F. & Hut, P. 1987, in IAU Symposium, Vol. 125, The Origin and Evolution of Neutron Stars, ed. D. J. Helfand & J.-H. Huang, 187, “*The Globular Cluster Population of X-Ray Binaries*”
- Verbunt, F., Wijers, R. A. M. J., & Burm, H. M. G. 1990, A&A, 234, 195, “*Evolutionary scenarios for the X-ray binary pulsars 4U 1626-67 and Hercules X-1, and their implications for the decay of neutron star magnetic fields*”
- Visvanathan, N. & Sandage, A. 1977, ApJ, 216, 214, “*The color-absolute magnitude relation for E and S0 galaxies. I - Calibration and tests for universality using Virgo and eight other nearby clusters*”
- Voges, W., et al. 1999, A&A, 349, 389, “*The ROSAT all-sky survey bright source catalogue*”
- Volonteri, M. & Perna, R. 2005, MNRAS, 358, 913, “*Dynamical evolution of intermediate-mass black holes and their observable signatures in the nearby Universe*”
- Vrtilek, S. D., Penninx, W., Raymond, J. C., Verbunt, F., Hertz, P., Wood, K., Lewin, W. H. G., & Mitsuda, K. 1991, ApJ, 376, 278, “*Observations of Scorpius X-1 with IUE - Ultraviolet results from a multiwavelength campaign*”
- Vrtilek, S. D., Raymond, J. C., Garcia, M. R., Verbunt, F., Hasinger, G., & Kurster, M. 1990, A&A, 235, 162, “*Observations of Cygnus X-2 with IUE - Ultraviolet results from a multiwavelength campaign*”
- Wachter, S. 1997, ApJ, 490, 401, “*New Results for Two Optically Faint Low-Mass X-Ray Binary Systems*”
- Wachter, S. & Margon, B. 1996, AJ, 112, 2684, “*Photometry of GX 349+2: Evidence for a 22-Hour Period*”
- Wachter, S., Wellhouse, J. W., & Bandyopadhyay, R. M. 2005, in American Institute of Physics Conference Series, Vol. 797, Interacting Binaries: Accretion, Evolution, and Outcomes, ed. L. Burderi, L. A. Antonelli, F. D’Antona, T. di Salvo, G. L. Israel, L. Piersanti, A. Tornambè, & O. Straniero, 639–642, “*Chandra Localizations of LMXBs: IR Counterparts and their Properties*”
- Walton, D. J., et al. 2013, ApJ, 779, 148, “*An Extremely Luminous and Variable Ultraluminous X-Ray Source in the Outskirts of Circinus Observed with NuSTAR*”
- Walton, D. J., Roberts, T. P., Mateos, S., & Heard, V. 2011, MNRAS, 416, 1844, “*2XMM ultraluminous X-ray source candidates in nearby galaxies*”
- Warner, B. 1995, Cataclysmic variable stars, ed. B. Warner, Cataclysmic variable stars
- Watson, M. G., et al. 2001, A&A, 365, L51, “*The XMM-Newton Serendipitous Survey. I. The role of XMM-Newton Survey Science Centre*”

- Watson, M. G., et al. 2009, *A&A*, 493, 339, “*The XMM-Newton serendipitous survey. V. The Second XMM-Newton serendipitous source catalogue*”
- Way, M. J. & Srivastava, A. N. 2006, *ApJ*, 647, 102, “*Novel Methods for Predicting Photometric Redshifts from Broadband Photometry Using Virtual Sensors*”
- Webb, N., et al. 2012, *Science*, 337, 554, “*Radio Detections During Two State Transitions of the Intermediate-Mass Black Hole HLX-1*”
- Webb, N. A., Godet, O., Wiersema, K., Lasota, J.-P., Barret, D., Farrell, S. A., Maccarone, T. J., & Servillat, M. 2014, *ApJ*, 780, L9, “*Optical Variability of the Accretion Disk around the Intermediate-mass Black Hole ESO 243-49 HLX-1 during the 2012 Outburst*”
- Werner, K., Nagel, T., Rauch, T., Hammer, N. J., & Dreizler, S. 2006, *A&A*, 450, 725, “*VLT spectroscopy and non-LTE modeling of the C/O-dominated accretion disks in two ultracompact X-ray binaries*”
- Werner, N., et al. 2004, *A&A*, 416, 311, “*X-ray spectral evolution of SAX J1747.0-2853 during outburst activity and confirmation of its transient nature*”
- Wetzel, A. R., Tinker, J. L., Conroy, C., & Bosch, F. C. v. d. 2014, *MNRAS*, 439, 2687, “*Galaxy evolution near groups and clusters: ejected satellites and the spatial extent of environmental quenching*”
- White, N. E., Giommi, P., & Angelini, L. 1994, *IAU Circ.*, 6100, “*WGACAT*”
- White, S. D. M. & Frenk, C. S. 1991, *ApJ*, 379, 52, “*Galaxy formation through hierarchical clustering*”
- Wijnands, R., et al. 2006a, *A&A*, 449, 1117, “*The XMM-Newton/Chandra monitoring campaign of the Galactic center region. Description of the program and preliminary results*”
- Wijnands, R., et al. 2006b, *The Astronomer’s Telegram*, 892, 1, “*Renewed activity of the very faint X-ray transient CXOGC J174535.5-290124 and continued activity of the neutron-star X-ray transient SAX J1747.0-2853*”
- Wijnands, R., Miller, J. M., & Wang, Q. D. 2002, *ApJ*, 579, 422, “*Chandra Observations of the Bursting X-Ray Transient SAX J1747.0-2853 during Low-Level Accretion Activity*”
- Wijnands, R. & van der Klis, M. 1998, *Nature*, 394, 344, “*A millisecond pulsar in an X-ray binary system*”
- Willis, A. J., et al. 1980, *ApJ*, 237, 596, “*Ultraviolet, visible, infrared, and X-ray observations of Scorpius X-1*”
- Wilson, C. A., Patel, S. K., Kouveliotou, C., Jonker, P. G., van der Klis, M., Lewin, W. H. G., Belloni, T., & Méndez, M. 2003, *ApJ*, 596, 1220, “*Chandra Observations of the Faintest Low-Mass X-Ray Binaries*”
- Witham, A. R., et al. 2007, *MNRAS*, 382, 1158, “*Newly discovered cataclysmic variables from the INT/WFC photometric H α survey of the northern Galactic plane*”
- Witham, A. R., Knigge, C., Drew, J. E., Greimel, R., Steeghs, D., Gänsicke, B. T., Groot, P. J., & Mampaso, A. 2008, *MNRAS*, 384, 1277, “*The IPHAS catalogue of H α emission-line sources in the northern Galactic plane*”
- Witham, A. R., et al. 2006, *MNRAS*, 369, 581, “*The properties of cataclysmic variables in photometric H α surveys*”
- Wray, J. J. & Gunn, J. E. 2008, *ApJ*, 678, 144, “*A New Technique for Galaxy Photometric Redshifts in the Sloan Digital Sky Survey*”
- Wright, E. L., et al. 2010, *AJ*, 140, 1868, “*The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial On-orbit Performance*”
- Wrobel, J. M., Nyland, K. E., & Miller-Jones, J. C. A. 2015, *AJ*, 150, 120, “*A Stacked Search for Intermediate-mass Black Holes in 337 Extragalactic Star Clusters*”
- Wyder, T. K., et al. 2007, *ApJS*, 173, 293, “*The UV-Optical Galaxy Color-Magnitude Diagram. I. Basic Properties*”
- Xiang, J., Lee, J. C., & Nowak, M. A. 2007, *ApJ*, 660, 1309, “*Using the X-Ray Dust Scattering Halo of 4U 1624-490 to Determine Distance and Dust Distributions*”
- Yasuda, N., et al. 2001, *AJ*, 122, 1104, “*Galaxy Number Counts from the Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data*”

- Yates, R. M., Kauffmann, G., & Guo, Q. 2012, MNRAS, 422, 215, “*The relation between metallicity, stellar mass and star formation in galaxies: an analysis of observational and model data*”
- Yi, S., Demarque, P., & Oemler, Jr., A. 1997, ApJ, 486, 201, “*On the Origin of the UV Upturn in Elliptical Galaxies. I. Sensitivity of UV Population Synthesis to Various Input Parameters*”
- Yi, S. K., et al. 2005, ApJ, 619, L111, “*Galaxy Evolution Explorer Ultraviolet Color-Magnitude Relations and Evidence of Recent Star Formation in Early-Type Galaxies*”
- Yungelson, L. R., Nelemans, G., & van den Heuvel, E. P. J. 2002, A&A, 388, 546, “*On the formation of neon-enriched donor stars in ultracompact X-ray binaries*”
- Zolotukhin, I. 2009a, The Astronomer’s Telegram, 2032, 1, “*Possible optical counterpart of IGR J17254-3257*”
- Zolotukhin, I., Bachetti, M., Sartore, N., Chilingarian, I., & Webb, N. A. 2016a, ArXiv e-prints, arXiv:1602.05191, “*The slowest spinning X-ray pulsar in an extragalactic globular cluster*”
- Zolotukhin, I., Webb, N. A., Godet, O., Bachetti, M., & Barret, D. 2016b, ApJ, 817, 88, “*A Search for Hyperluminous X-Ray Sources in the XMM-Newton Source Catalog*”
- Zolotukhin, I. Y. 2009b, “*Кандидатская диссертация*”, PhD thesis, Кандидатская диссертация, МГУ им. М. В. Ломоносова
- Zolotukhin, I. Y. & Chilingarian, I. V. 2011, A&A, 526, A84+, “*Virtual Observatory based identification of AX J194939+2631 as a new cataclysmic variable*”
- Zolotukhin, I. Y. & Revnivtsev, M. G. 2011, MNRAS, 411, 620, “*Sample of LMXBs in the Galactic bulge - I. Optical and near-infrared constraints from the Virtual Observatory*”
- Zolotukhin, I. Y. & Revnivtsev, M. G. 2015, MNRAS, 446, 2418, “*Sample of optically unidentified X-ray binaries in the Galactic bulge: constraints on the physical nature from infrared photometric surveys*”
- Zolotukhin, I. Y., Revnivtsev, M. G., & Shakura, N. I. 2010, MNRAS, 401, L1, “*Infrared identification of 4U1323-619 revisited*”