

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

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 и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации
на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в отделе релятивистской астрофизики Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга МГУ

Научный консультант:

доктор физико-математических наук Чилингарян Игорь Владимирович,
ведущий научный сотрудник отдела физики эмиссионных звезд и галактик
ГАИШ МГУ

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук Бикмаев Ильфан Фяритович,
доцент, заведующий кафедрой астрономии и космической геодезии
Казанского федерального университета
- доктор физико-математических наук Решетников Владимир Петрович,
профессор, Санкт-Петербургский государственный университет
- доктор физико-математических наук Сазонов Сергей Юрьевич,
заведующий сектором научной поддержки обсерватории Спектр-РГ
отдела астрофизики высоких энергий ИКИ РАН, профессор РАН

Ведущая организация:

Институт астрономии Российской академии наук

Защита состоится 6 апреля 2017 года в 14⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д501.001.86 в Государственном астрономическом институте им. П. К. Штернберга МГУ по адресу: 119234, г. Москва, Университетский пр-т, д. 13.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке МГУ (119192, Москва, Ломоносовский пр-т, д. 27, Фундаментальная библиотека).

Автореферат разослан 15 декабря 2017 года.

Ученый секретарь диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук

С. О. Алексеев



Общая характеристика работы

Диссертация посвящена изучению редких астрофизических объектов в больших массивах публично доступных данных и представляет собой, таким образом, пример *data science* — отгалкивающегося 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 используемых 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 глубоких 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 высо-

кой научной ценностью — например, в каталогах эксперимента *Спектр-РГ*.

На защиту выносятся

1. Отождествление в оптическом и ближнем инфракрасном диапазонах 13 рентгеновских двойных систем из балджа Галактики; ограничения на их физические параметры, 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.

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. Mechior, 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. Kuposov, 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.

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 ЗХММ, 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 ЗХММ 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.

Содержание работы по главам

Глава 1: Каталоги и базы данных астрофизических объектов

В главе дано методическое введение в диссертацию.

В первой части описывается создание каталога галактик RCSED (Reference Catalog of Spectral Energy Distributions of galaxies). Он представляет собой 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 Слоановского цифрового обзора неба (Sloan Digital Sky Survey, SDSS). Доступность продуктов каталога в Виртуальной Обсерватории (Virtual Observatory, VO) и дополненность подробной информацией о свойствах галактик, полученной новейшими методами анализа, позволяет использовать RCSED для изучения формирования и эволюции галактик в течении последних 5 млрд. лет. В главе представлена таблица преобразований цвета для галактик различных морфологических типов и классов светимости и аналитические выражения для формы красной последовательности в разных фотометрических цветах. RCSED включает в себя исправленную за k -поправки фотометрию в 11 ультрафиолетовых, оптических и ближних инфракрасных полосах из обзоров GALEX, SDSS и UKIDSS; результаты определения параметров звездного населения по спектрам SDSS; дисперсии скоростей; параметрические истории звездообразования; звездные металличности, вычисленные для моделей мгновенных вспышек звездообразования и экспоненциально затухающего звездообразования; параметрические и непараметрические потоки и профили эмиссионных линий; металличности газа. Помимо про-

чего галактики из RCSED связаны с морфологической классификацией галактик Galaxy Zoo и результатами декомпозиции галактик балдж+диск по Simard et al. В главе приводятся зависимости цвет–величина, Faber–Jackson, масса–металличность, они сравниваются с литературой, также обсуждаются систематические расхождения свойств галактик представленных в каталоге. RCSED доступен через веб-сайт проекта <http://rcsed.sai.msu.ru>, а также с помощью всех популярных инструментов VO. Кроме того в главе даны несколько примеров научных запросов к базе данных RCSED на языке SQL. В заключении этой части кратко обсуждаются настоящие и будущие научные приложения RCSED и перспективы расширения каталога на большие красные смещения и дополнительные диапазоны длин волн.

Во второй части главы описывается создание крупнейшего каталога рентгеновских источников, основанного на публично доступных данных обсерватории *XMM-Newton*. Благодаря значительной собирающей площади детектора ($3 \times \simeq 1500 \text{ см}^2$ на 1.5 кэВ) и широкому полю зрения ($30'$ в режиме полного поля) рентгеновских камер на борту обсерватории *XMM-Newton* Европейского Космического Агентства, на каждой экспозиции фиксируется до нескольких сотен рентгеновских источников, большинство из которых представляют собой впервые обнаруженные объекты. *XMM-Newton* находится на орбите более 15 лет и таким образом за это время были обнаружены сотни тысяч рентгеновских объектов, лишь малая часть которых изучена. В последние годы программное обеспечение для работы с данными *XMM-Newton* претерпело значительные изменения – была улучшена работа с артефактами и обнаружением слабых объектов, усовершенствована астрометрическая калибровка, появилась возможность извлекать спектры и временные ряды с более высоким отношением сигнал–шум для более слабых объектов. Таким образом качество продуктов каталога *XMM-Newton* было существенным образом улучшено. Вдобавок почти на 50% увеличилось количество публично доступных наблюдений по сравнению с предыдущей версией каталога, 2XMMi-DR3. В главе описывается процедура создания каталога 3XMM и его релиза 3XMM-DR5, включившего в себя 565 962 регистраций 396 910 уникальных рентгеновских источников. Для 133 000 регистраций в каталоге до-

ступны рентгеновские спектры и кривые блеска. Для каждой рентгеновской регистрации в каталоге приводятся астрометрическое положение, статистическая значимость обнаружения, оценка переменности потока, а также сами потоки в 7 рентгеновских полосах в диапазоне от 0.2 до 12 кэВ. Для удобства пользования каталогом было разработано специальное научное веб-приложение, <http://xmm-catalog.irap.omp.eu>. Таким образом 3XMM-DR5 стал крупнейшим из когда-либо созданных каталогов рентгеновских источников, а связанный с ним широкий набор различных продуктов данных позволяет предпринимать поиск новых рентгеновских объектов. Примерам таких поисков посвящена Глава 4.

Глава 2: Исследования рентгеновских источников

Глава посвящена исследованиям рентгеновских источников в оптическом и инфракрасном диапазонах, разработке наблюдательно эффективных методов классификации неизученных объектов и наложению ограничений на их физические параметры.

В первой части описано успешное отождествление и классификация рентгеновского источника AX J194939+2631 в плоскости Галактики с большой неопределенностью положения в $1'$. Исключительно по данным Виртуальной Обсерватории оказалось возможно выбрать единственный объект из 400 позиционных кандидатов, который затем был подтвержден прямыми спектральными наблюдениями в оптическом диапазоне.

Вторая часть главы посвящена описанию модели облученного аккреционного диска и его наблюдательным проявлениям в ближнем ИК диапазоне. Множество рентгеновских объектов, особенно расположенных в центральных областях Галактики, скрыты от нас существенным поглощением в 20–40 зв. величин в оптическом диапазоне. Наблюдательные методы их исследования поэтому смещаются из оптического в ИК диапазон, гораздо менее чувствительный к поглощению на луче зрения. В главе описывается и проверяется на литературных данных новая зависимость светимости аккреционного диска в ближнем ИК диапазоне от орбитального периода системы для постоянных

LMXB. С данной зависимостью период–светимость лишь по 1 наблюдению в ИК диапазоне становится возможным оценка орбитального периода двойной системы. Существенные отклонения от этой зависимости указывают на наличие дополнительного вклада в ИК светимость – например, джета – либо на неприменимость модели и другую физическую природу ИК излучения, а следовательно и другое устройство двойной системы. Эта модель таким образом становится важным компонентом для разработанного в диссертации метода характеристики рентгеновских источников.

Третья и четвертая части главы посвящены применениям и дальнейшему развитию метода характеристики рентгеновских источников на примере отождествлений 13 рентгеновских двойных в оптическом и ИК диапазонах на основании публично доступных данных из Виртуальной Обсерватории. Отталкиваясь от цифрового ИК обзора неба UKIDSS и используя помимо этого широкий набор данных из ВО, была изучена выборка рентгеновских источников из центра Галактики, недоступных для наблюдений в оптическом диапазоне из-за существенного поглощения на луче зрения. Описываются оптические отождествления следующих маломассивных 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 и Ser X–1 и полученные в результате исследований ограничения на их орбитальные периоды. В данном разделе описывается использование диаграммы цвет–величина для звезд из окрестности рентгеновских координат как элемента проверки достоверности выбора оптического двойника. В результатах этой части описываются аргументы в пользу того, что в системе IGR J17597–2201 нейтронная звезда аккрецирует звездный ветер компаньона и таким образом принадлежит к редкому классу симбиотических LMXB. Для системы SLX 1735–269 было получено верхнее ограничение на орбитальный период $P_{\text{orb}} < 2$ ч, что делает ее одной из самых компактных двойных систем с нейтронной звездой вне шарового скопления. Данная глава завершает описание характеристики рентгеновских систем на основании данных Виртуальной Обсерватории – метода, который будет использован позднее в Главе 4.

Глава 3: Нормальные и компактные галактики

Глава посвящена исследованиям нормальных (неактивных) галактик с использованием данных Виртуальной Обсерватории.

В первой части настоящей главы описывается обнаружение самого тесного из известных фотометрического соотношения для нормальных галактик, сделанного с помощью методических наработок из Главы 1, в первую очередь каталога свойств галактик RCSED.

Бимодальное распределение галактик на диаграмме оптический цвет - звездная величина (colour-magnitude diagram, CMD) содержит узкую “красную последовательность”, относящуюся к населению в основном раннего типа галактик и широкое “синее облако”, где доминируют звездообразующие системы. Хотя оптическая CMD и позволяет выбирать объекты красной последовательности, 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. В главе показывается, что добавление ближнего ультрафиолетового цвета (*GALEX NUV* $\lambda_{\text{eff}} = 227$ 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 с низким красным смещением ($z < 0.27$) 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 пока известных фотометрических соотношений для галактик. Подобные соотношения приведены и для других ближних УФ-оптических цветов. Описывается сильная корреляция между морфологическими типами и интегрированными цветами $NUV - r$ галактик, в то время как связь с цветом $g - r$ неоднозначна. Галактики редких классов, такие как E+A, или галактики, ободранные приливными силами, выпадают из этого соотношения и занимают определенные области в трехмерном пространстве параметров. При использовании моделей звездных населений для галактик с разной историей звездообразования в главе показывается, что (а) распре-

деление ($NUV - r, g - r$) при заданной светимости формируется объектами с постоянной и экспоненциально уменьшающейся скоростью звездообразования с различными характерными временными шкалами с красной последовательности и частично простым звездным населением; (б) эволюция цвета для моделей с экспоненциальным затуханием идет “вдоль соотношения”, предполагая слабую эволюцию формы соотношения вплоть до красных смещений 0.9; (в) галактики с прервавшимся звездообразованием имеют очень короткий фазовый переход, смещаясь от соотношения, таким образом, объясняя редкость галактик класса E+A. Это соотношение может использоваться в качестве мощного инструмента для классификации галактик, когда вопрос о морфологии остается нерешенным. Математическим следствием соотношения является возможность точной и простой оценки красного смещения по всего трем измерениям широкополосной фотометрии. В главе показано, что этот простой подход, будучи примененным к данным цифровых обзоров неба *SDSS* и *GALEX*, работает лучше, чем большинство существующих фотометрических методов определения красного смещения, применяемых для многоцветных наборов данных. Таким образом, настоящее соотношение можно использовать в качестве эффективного метода поиска галактик на промежуточных красных смещениях ($0.3 < z < 0.8$), используя лишь оптические изображения.

Во второй части главы приводится описание масштабного поиска компактных эллиптических галактик, свободного от эффектов селекции, связанных с окружением, выполненного с использованием каталога RCSED и описываемого в первой части главы фотометрического соотношения. Компактные эллиптические галактики представляют собой редкий класс звездных систем (до работ, выполненных в рамках настоящей диссертации, было известно всего около 30 объектов), характеризующихся высокой звездной плотностью, небольшим размером и часто высокометаллическим звездным населением. До тех пор, пока не были найдены две изолированные галактики с такими свойствами, считалось, что подобные объекты формируются из массивной галактики-прародительницы путем приливного обдирания. В данной

части главы описывается обнаружение в данных публично доступных обзоров неба 195 компактных эллиптических галактик во всех типах окружений. Показывается, что все они обладают схожей динамикой и свойствами звездных населений. Описывается динамический анализ для неизолированных галактик, который подтверждает возможность их выбрасывания за пределы родительских скоплений или групп из-за эффектов взаимодействия трех тел. В качестве основного результата приводится вывод о том, что изолированные компактные эллиптические галактики и, вероятно, другие карликовые галактики без признаков активного звездообразования, являются системами, ободранными приливными взаимодействиями и выброшенными далеко за пределы мест их образования.

Глава 4: Поиск редких астрофизических объектов

Глава посвящена поиску внегалактических рентгеновских пульсаров и гипер-ярких рентгеновских источников, выполненному в данных Виртуальной Обсерватории с использованием методических наработок из предыдущих глав.

В первой части представлен новый метод поиска ярких внеядерных рентгеновских источников на окраинах галактик из больших открытых спектральных обзоров, с отделением их от случайного наложения не связанных с галактикой объектов переднего и заднего фона. Используя каталог рентгеновских источников 3XMM-DR5 и спектроскопическую выборку галактик SDSS DR12, с помощью их взаимного отождествления по координатам было отобрано 98 объектов с предполагаемой рентгеновской светимостью в диапазоне $10^{41} < L_X < 10^{44}$ эрг s^{-1} , представляющих собой кандидаты в гипер-яркие рентгеновские источники (hyper-luminous X-ray sources, HLX). Для проверки метода показывается, что он позволяет выявить уже известные HLX кандидаты, такие как ESO 243–49 HLX–1 and M82 X–1. Из статистического исследования оценивается, что до 71 ± 11 из этих объектов могут быть объектами заднего и переднего фона, что оставляет по крайней мере 16 объектов, являющиеся скорее всего настоящими HLX. Таким образом это дает нам право говорить о существовании популяции гипер-ярких рентгеновских источников.

Идентифицированы два хороших HLX кандидата и, используя другие открытые данные, в частности VLA FIRST в радиодиапазоне, UKIDSS в ближнем ИК, *GALEX* в УФ и CFHT Megacam в оптическом диапазонах, представлены аргументы в пользу 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. Однако требуются дополнительные рентгеновские и оптические наблюдения, чтобы окончательно подтвердить их связь с родительскими галактиками и таким образом подтвердить их классификацию как HLX объектов.

Вторая часть посвящена обнаружению необычного внегалактического пульсара, расположенного в шаровом скоплении B091D в галактике Андромеды. Обычно считается, что нейтронные звёзды рождаются быстро вращающимися, а затем проходят фазу пульсаций, подпитываемых вращением, замедляясь до периодов 1–10 с. Наличие существенного количества миллисекундных пульсаров в нашей Галактике объясняется концепцией *раскрутки*: в течение эпохи аккреции с донорской звезды в двойной системе нейтронная звезда ускоряется до миллисекундных периодов. Однако наблюдается лишь несколько пульсаров на стадии раскрутки, все с достаточно высокой частотой вращения. В главе описывается обнаружение рентгеновского пульсара с $P_{\text{spin}} = 1.20$ с в шаровом скоплении B091D туманности Андромеды, самого медленного когда-либо найденного в шаровом скоплении. Этот яркий (до 30% эддингтоновской светимости) раскручивающийся пульсар, наблюдавшийся в течение более 12 лет начал аккрецировать вещество менее 1 млн. лет назад и ещё 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 металлами скоплении возрастом 12 млрд. лет и получает вещество от маломассивного, немного проэволюционировавшего после главной последовательности компаньона. В данной части приводятся аргументы, что мы наблюдаем двойную систему, сформировавшуюся относительно недавно путём захвата звезды с массой $\sim 0.8M_{\odot}$ при динамическом взаимодействии, которое является жизнеспособным сценари-

ем в таком массивном и плотном шаровом скоплении как В091D, где высоки глобальная и удельная частота звёздных сближений. Таким образом, этот интенсивно аккрецирующий нераскрученный рентгеновский пульсар является долгожданным недостающим звеном в стандартной теории раскрутки пульсаров аккрецией.