

Отзыв официального оппонента

на диссертацию **Золотухина Ивана Юрьевича**

«Многоволновые исследования редких астрофизических объектов с использованием больших массивов данных»,

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 – астрофизика, звездная астрономия.

Диссертационная работа посвящена изучению редких астрофизических объектов, таких как компактные эллиптические галактики и гиперяркие рентгеновские источники, на основе больших массивов данных, находящихся в открытом доступе. Для решения поставленных задач диссертантом разработаны оригинальные методы использования данных инфракрасных, оптических, ультрафиолетовых и рентгеновских обзоров, с их помощью получен ряд важных результатов.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 240 страниц текста с 72 рисунками и 22 таблицами. Список литературы содержит 487 наименований.

Первая глава посвящена описанию методов, с помощью которых были получены результаты диссертации. Вначале описывается созданный при активном участии диссертанта каталог RCSED – справочный каталог распределений энергии в спектрах галактик. Он содержит однородные спектрофотометрические данные для 800 тысяч галактик на малых и средних красных смещениях, из оптического обзора SDSS. Помимо данных SDSS, в каталоге использованы фотометрические данные ультрафиолетового обзора GALEX и обзора в близком инфракрасном диапазоне UKIDSS. Каталог предоставляет подробную информацию о свойствах галактик. В частности, он позволяет изучать процессы формирования и эволюции галактик за последние 5 миллиардов лет. Помимо основного достоинства каталога, заключающегося в однородности и разнообразии представленной в нем информации о галактиках, он также ценен тем, что его авторам удалось улучшить точность измерения ряда характеристик галактик по сравнению с другими каталогами, а также в том, что он полностью интегрирован в инфраструктуру международной Виртуальной Обсерватории и удобен для использования (в чем лично убедился оппонент). Важно также отметить, что диссертант и его коллеги собираются расширить каталог на другие диапазоны длин волн и б'ольшие красные смещения на основе дополнительных массивов данных.

Далее в первой главе представлено краткое описание третьего каталога рентгеновских источников обсерватории XMM-Newton. Диссертант принял активное участие в создании последней версии (DR5) этого крупнейшего каталога рентгеновских источников (около 400 тысяч объектов) — уникальной базы данных для систематического исследования многих классов рентгеновских источников.

Вторая глава посвящена изучению рентгеновских источников в нашей Галактике по данным многоволновых наблюдений. Эта глава содержит ряд интересных научных результатов, среди которых в первую очередь можно отметить обнаруженную тесную корреляцию между рентгеновской светимостью,

орбитальным периодом и абсолютной звездной величиной в близком ИК диапазоне для маломассивных рентгеновских двойных систем (LMXB). Эта корреляция аналогична хорошо известному соотношению для оптического диапазона, но лучше подходит для изучения слабых LMXB из-за меньшего влияния межзвездного поглощения. Ее ценность продемонстрирована на примере поиска оптических и инфракрасных двойников у набора LMXB, расположенных в балдже Галактики. Сам поиск является чрезвычайно сложным из-за низкой яркости исследуемых объектов и большой концентрации звезд, однако диссертанту с коллегами все же удалось найти вероятных двойников для ряда объектов. Более важно однако то, что даже для тех LMXB, от которых не был зарегистрирован сигнал, полученные верхние пределы на поток в близком ИК диапазоне позволили получить интересные ограничения на размер двойной системы на основе упомянутой выше корреляции. В частности, была обнаружена компактная система с периодом меньше 2 часов. Еще один интересный результат – открытие симбиотической LMXB системы. Подобные объекты очень редки и представляют большой интерес.

Третья глава посвящена классификации галактик и поиску галактик редких видов. В первой части главы показано, что если к стандартной диаграмме цвет-звездная величина, полученной по данным оптических наблюдений добавить измерение цвета в ближнем ультрафиолетовом диапазоне, то в таком трехмерном пространстве подавляющее большинство галактик без активного ядра «ляжет» на гладкую поверхность, тянущуюся от «голубого облака» до «красной последовательности». Далее показано, что наличие такой «фундаментальной поверхности» галактик хорошо объясняется в рамках модели эволюции звездного населения галактик с экспоненциально затухающим темпом звездообразования. Одним из важных выводов этой работы является то, что по данным широкополосной фотометрии в двух оптических и одной ультрафиолетовой полосах можно получать весьма точные оценки красного смещения галактик вплоть до $z \sim 0.5$, причем, по-видимому, этот метод может быть распространен и на большие красные смещения, если использовать более красный набор фильтров.

Как далее показано в третьей главе, около двух процентов галактик имеют нестандартные цвета и не лежат на «фундаментальной поверхности» галактик. Среди них — компактные эллиптические галактики. Ранее было известно всего несколько десятков таких необычных объектов. Диссертанту с коллегами удалось увеличить эту выборку более чем в 5 раз, используя новый метод поиска, в основе которого лежит выявление «выбросов» на трехмерной диаграмме цвет-цвет-звездная величина галактик. Очень интересным результатом является обнаружение 11 изолированных компактных эллиптических галактик. В качестве объяснения их существования предложена красивая гипотеза, что эти объекты были выброшены из скоплений в результате тройных взаимодействий галактик.

Четвертая глава посвящена поиску редких астрофизических объектов среди рентгеновских источников. Проведен поиск так называемых гиперярких рентгеновских источников, то есть источников со светимостью выше 10^{41} эрг/с, связанных с галактиками, но не с их ядрами. Наиболее вероятная природа таких объектов — аккреция на черную дыру промежуточной массы. Такие черные дыры, по всей видимости, существуют во Вселенной и представляют огромный интерес, но до сих пор достоверно не обнаружены. Диссертант провел самый масштабный на сегодняшний день поиск гиперярких рентгеновских источников. Итоговая выборка составила около 100 объектов, большинство из которых, однако, могут

быть источниками переднего или заднего плана. Тем не менее, около 20 объектов из выборки могут оказаться истинными гиперяркими источниками. Среди них, в первую очередь, следует обратить внимание на ряд источников с высоким отношением рентгеновского и оптического/инфракрасного потоков. Подробное исследование кандидатов было начато в диссертации и должно быть продолжено.

Еще один интересный результат, описанный в четвертой главе, — обнаружение с помощью разработанной диссертантом «фабрики пульсаров» нераскрученного рентгеновского пульсара с периодом 1.2 сек в шаровом скоплении в галактике Андромеды. Это самый медленный пульсар, когда-либо найденный в шаровых скоплениях. По всей видимости, нейтронная звезда в этой системе стала аккрецировать вещество не более 1 млн. лет назад. Объект является очень интересным с точки зрения развития теории раскрутки пульсаров, а также сценариев формирования и эволюции тесных двойных систем.

Диссертацию в целом можно охарактеризовать как прорывное научное исследование, посвященное разработке и применению новых методов астрофизических исследований. Следует отметить новизну проведенных исследований и полученных результатов. Выносимые на защиту научные заключения хорошо обоснованы, достоверны и весьма значимы для развития теории формирования и эволюции галактик и астрофизики высоких энергий. Основные результаты диссертации неоднократно докладывались на семинарах, российских и международных конференциях, опубликованы в высокорейтинговых научных журналах.

У оппонента есть несколько вопросов и замечаний к диссертации:

- 1) В разделе 2.2, на рис. 2.10 приводится измеренная корреляция между абсолютной звездной величиной в ближнем ИК диапазоне и комбинацией рентгеновской светимости с орбитальным периодом для 7 LMXB, а также результаты соответствующего моделирования. Из рисунка следует, что все 7 объектов неплохо согласуются с результатом расчетов для примерно нулевого угла наклона. Есть ли объяснение, с чем это связано? Для нескольких из представленных систем существуют независимые оценки угла наклона, и эти углы разные.
- 2) В разделе 2.3, на стр. 101-102 оценивается вероятность случайного попадания фоновых источников в рентгеновскую область ошибок. При этом для одних объектов оценка делается для полосы I, а для других — для полосы K. На мой взгляд, рассчитанные таким образом вероятности не являются эквивалентными, и их не совсем правильно затем суммировать. Интересно, что далее, в разделе 2.4, похожие вероятности считаются однородным образом, а именно в фильтре K.
- 3) В разделе 3.1, на стр. 140, при обсуждении метода определения красного смещения с помощью трехмерной полиномиальной функции наблюдаемых двух цветов и звездной величины, стоило бы привести в явном виде формулу расчета (набор коэффициентов), чтобы сторонние исследователи могли воспользоваться этим методом и провести его независимую проверку.
- 4) В разделе 4.1, на стр. 187, сделана оценка пространственной плотности гиперярких рентгеновских источников, со светимостью выше 10^{41} эрг/с. Было бы интересно нормировать это значение на интегральный темп звездообразования

в локальной Вселенной и сравнить полученное значение с известной удельной функцией светимости ультраярких рентгеновских источников (со светимостью ниже 10^{41} эрг/с). По моим грубым оценкам, полученная диссертантом оценка плотности гиперярких рентгеновских источников означает, что функция светимости ультраярких рентгеновских источников имеет завал в районе 10^{41} эрг/с. Это очень важный результат, независимо от того являются ли гиперяркие рентгеновские источники аккреторами промежуточных масс или наиболее экстремальными представителями сверхкритических аккреторов звездной массы.

Все эти замечания не являются существенными и никак не влияют на высокое научное значение диссертации.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 01.03.02 – астрофизика, звездная астрономия, а ее автор **Золотухин Иван Юрьевич** заслуживает присвоения ему степени доктора физико-математических наук.

Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Заведующий лабораторией экспериментальной астрофизики
отдела астрофизики высоких энергий
ФГБУН Институт космических исследований
Российской академии наук,
доктор физико-математических наук,
профессор РАН

С.Ю. Сазонов

Почтовый адрес: 117997 Москва,
ул. Профсоюзная 84/32,
ФГБУН Институт космических
исследований Российской академии наук

Телефон: 495 9133116
Электронный адрес: sazonov@iki.rssi.ru

Подпись С.Ю. Сазонова заверяю,
Ученый секретарь ИКИ РАН,
доктор физико-математических наук



А.В. Захаров

17 марта 2017 г.