

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Котова Сергея Сергеевича

«Поиск активных ядер галактик и изучение их физических свойств по данным
среднеполосного фотометрического обзора на 1-м телескопе Шмидта»

представленной на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

(Специальность 01.03.02 — «астрофизика и звёздная астрономия»)

1. Актуальность темы диссертации.

Изучение природы активных галактик, в центральной части которых находятся сверхмассивные черные дыры (СМЧД), в настоящее время является одним из приоритетных направлений современной астрофизики наряду с изучением темной материи, темной энергии, поиска гравитационных волн, поиска и изучения экзопланет. Благодаря большой светимости, оптически самые яркие АЯГ I типа (квazarы) позволяют проследить распределение материи на значительных расстояниях (самый далекий квазар находится на $z = 7$). Квазары могут использоваться для расчета ограничений на космологические модели, рассматриваются возможности использования квазаров в качестве стандартных свечей. Поэтому для многочисленных задач в астрофизике проблема определения полного числа активных ядер галактик является фундаментальной.

Корректное построение функции светимости квазаров является не простой задачей. Основная трудность заключается в получении репрезентативной выборки объектов во всём исследуемом диапазоне характеристик, таких как красное смещение, тип активного ядра, его абсолютная величина. Это предопределило конкретные задачи работы диссертанта - разработать методику отбора квазаров по данным среднеполосной фотометрии, полученной на 1-м телескопе Шмидта БАО НАН, чтобы получить максимально полную выборку квазаров поля. Провести определение фотометрических красных смещений отобранных кандидатов в квазары. Промоделировать полноту отбора квазаров по среднеполосным фотометрическим данным. Провести оценку селекционных эффектов. Конечной целью представленной работы было изучение эволюции активных ядер галактик и построение их функции светимости в широком диапазоне красных смещений $0.1 < z < 5$. Все это предопределило актуальность проведенного исследования.

Диссертационная работа Котова С. С. состоит введения, четырех глав, заключения и приложения. Полный объем диссертации 105 страниц текста с 30 рисунками и 3 таблицами. Список литературы содержит 112 наименований.

В качестве новых научных результатов автор выделил следующее:

1. Получены среднеполосные фотометрические наблюдательные данные для однородного поля NS47.5-22 площадью 2.38 квадратных градуса до $RAB = 22.5 m$.

2. Разработан алгоритм отбора кандидатов в квазары, использующий как собственные данные среднеполосной и широкополосной фотометрии на 1-м телескопе Шмидта, так и данные оптических, инфракрасных, астрометрических, рентгеновских и радио обзоров. Оценена эффективность применения алгоритма для задач отбора квазаров и поиска необычных объектов.

3. Произведен отбор кандидатов в квазары в поле NS47.5-22 площадью 2.38 квадратных градуса до $RAB = 22.5 m$.

4. Создан однородный до $RAB = 22.5 m$ каталог кандидатов в квазары в поле HS47.5-22, содержащий данные 682 объектов.

5. Построена функция светимости, демонстрирующая более высокие значения в диапазоне красных смещений $3 < z < 4$, в сравнении с данными существующих обзоров SDSS, COMBO-17, COSMOS, ALHAMBRA.

Научная и практическая значимость.

1. Новый метод отбора квазаров позволяет создавать репрезентативные выборки для построения функции светимости и изучения космологической эволюции активных ядер галактик, что принципиально важно для понимания эволюции сверхмассивных черных дыр во Вселенной.

2. Созданный каталог квазаров с фотометрическими красными смещениями является актуальным для анализа функции светимости квазаров и изучения эволюции активных ядер галактик.

Автор выносит на защиту следующие положения:

1. Исследованы и показаны возможности модернизированного 1-м телескопа Шмидта БАО НАН для глубокой фотометрии в широких полях с широкополосными и среднеполосными фильтрами. Для звездообразных объектов в широкополосных фильтрах за 2 часа экспозиции достигается глубина $25m$, а в среднеполосных фильтрах за 1 час экспозиции достигается глубина $23m$.

2. Разработка методики отбора кандидатов в квазары по среднеполосным и широкополосным фотометрическим данным в поле HS47.5-22. Методика использует в качестве критерия отбора плотность ближайших соседей в многомерном цветовом пространстве и данные фотометрии в ближнем инфракрасном диапазоне.

3. Каталог из 682 квазаров в поле HS47.5-22. Для 473 из них впервые проведена классификация и определены красные смещения по данным среднеполосной фотометрии на 1-м телескопе Шмидта и спектроскопии на телескопе БТА САО РАН.

4. Функция светимости квазаров, построенная по полученной выборке, которая демонстрирует более высокие значения в диапазоне красных смещений $3 < z < 4$, в сравнении с данными обзора COMBO-17.

2. Общая характеристика диссертации

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, обосновывается научная новизна и практическая значимость представляемой работы

Первая глава посвящена описанию различных методов поиска активных ядер галактик и методик создания репрезентативных выборок квазаров. Рассматриваются их сильные и слабые стороны, приводится анализ методов создания выборок, отмечены возможных селекционные эффекты, возникающих при использовании этих методов. Обоснован выбор среднеполосной фотометрии для изучения эволюции активных ядер галактик.

Во второй главе подробно описаны работы по модернизации 1-м телескопа Шмидта БАО НАН и проведению среднеполосного фотометрического обзора. К ним относятся: замена CCD-детектора, оснащенного турелью с двадцатью среднеполосными фильтрами ($FWHM = 250 \text{ \AA}$), равномерно покрывающими спектральный диапазон $4000 - 9000 \text{ \AA}$, и пятью широкополосными фильтрами (u, g, r, i, z SDSS), что крайне важно для реализации фотометрического обзора; модернизация системы охлаждения камеры; исследование фотометрической стабильности детектора в условиях реальных наблюдений;

Для наблюдений автором было выбрано поле HS47.5-22 в котором ранее было обнаружено 144 рентгеновских источников и 362 радиоисточника. Подробно описаны наблюдения, которые проводились в 2017 - 2018 годах. Показано, что достижимая глубина составила $m_{AB} \approx 25m$ при соотношении сигнал-шум 5 в широкополосных фильтрах и $m_{AB} \approx 23m$ при соотношении сигнал-шум 3 в среднеполосных фильтрах. Полученные снимки обрабатывались авторским пакетом программ на языке IDL. Общее число объектов поля HS47.5-22 до $R_{AB} \approx 24.5 m$ составило около 85000. Полная выборка 28564 объектов поля ограничена предельной звездной величиной $R_{AB} \approx 22.5 m$, до которой получены снимки в среднеполосных фильтрах с отношением сигнал/шум $\sim 5 - 10$. В итоге диссертант показал, что многополосная фотометрия является оптимальным методом для создания репрезентативной выборки квазаров с точки зрения затрат телескопного времени, размера поля зрения телескопа, достижимой глубины обзора и качества классификации объектов

Третья глава посвящена методике отбора квазаров и изучению влияния селекционных эффектов. Диссертант провел покоординатное отождествление объектов с другими обзорами, исследуя морфологические и фотометрические характеристики известных квазаров. Развил концепцию отделения необычных объектов от последовательности звёзд при помощи критерия плотности ближайших соседей в многомерном пространстве широкополосных фильтров. Рассмотрел комбинации критерия плотности ближайших соседей с различными цветовыми критериями для выделения квазаров. Изучил возможности использования данных о собственных движениях звёзд из обзора 13 Gaia для отделения квазаров от звёзд. Описал финальный этап визуального отбора квазаров по среднеполосным спектральным распределениям энергии, а также методику определения среднеполосных фотометрических красных смещений и создание итогового каталога квазаров. Провел моделирование полноты отбора квазаров в данной методике и показал, что при больших красных смещениях ($z > 2,2$) вероятность обнаружения линий оценивается в 80% и выше для объектов ярче $AB = 22,5 m$. В свою очередь, на красных смещениях $1 < z < 2,2$ полнота отбора более 90% достигается применением широкополосных критериев $u-g < 0.6$ и $w1-w2 > 0.4$. Итогом стало создание каталога из 682 квазаров. Представляется, что этот новый результат очень важен для последующего анализа и понимания физических процессов в АЯГ

Четвертая глава посвящена построению функции светимости квазаров по данным созданного каталога. Описывается методика определения абсолютных звездных величин и учёта геометрии пространства. Для построения функции пространственной плотности и функции светимости квазаров использовались фотометрические красные смещения. Была учтена геометрия сопутствующего объема и рассчитаны абсолютные звездные величины квазаров на длине волны 145 nm . Для вычисления абсолютных звездных величин брались данные фотометрии в фильтре i -SDSS, рассчитывалась K-поправка [32] и проводился пересчёт на $\lambda = 145 \text{ nm}$ по шаблонному спектру квазара с наклоном континуума $\alpha = -0.75$,

также учитывалось межгалактическое поглощение согласно модели Мадау. Была проведена коррекция за неполноту выборки согласно построенной модели. Приведено сравнение полученной пространственной плотности и функции светимости квазаров с данными обзоров SDSS, COMBO-17, COSMOS, ALHAMBRA.

В заключении приведены основные результаты работы.

В приложении приводится созданный каталог квазаров с данными о координатах, красных смещениях и звездной величине в фильтре *r-SDSS*.

3. Рекомендации по использованию полученных результатов

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в научных учреждениях России и других стран, в которых ведутся исследования АЯГ, в том числе: САО РАН, ИНАСАН, ГАИШ МГУ, ИКИ РАН, КрАО РАН, СПбГУ.

4. Замечания по диссертационной работе.

1. Стр.4. выражение «...обнаружили барионные акустические осцилляции (БАО) в *Ly α* лесу в спектре квазаров ...». Вероятно в *Ly α* полосе??
2. Стр. 19 «При рассмотрении селекционных эффектов стоит отметить тот факт, что на красном смещении *z* все процессы для наблюдателя происходят в *z + 1* раз медленнее, нежели в системе покоя». Стоило бы пояснить, что такое система покоя.
3. Стр.30 не совсем удачное выражение «**На этом пути** низкодисперсионная спектрофотометрия может быть получена для всех объектов в поле зрения телескопа».
4. На стр. 32. «Спектральная чувствительность камеры позволяет работать практически во всём оптическом диапазоне; **измерения** спектральной чувствительности, сделанные нами в лаборатории, приведены на ...» Правильнее будет сказать, результаты измерений спектральной чувствительности ... приведены.
5. На стр. 33. «Для наблюдений нами было выбрано поле HS47.5-22, – одно из полей с **глубоким накоплением рентгеновского спутника ROSAT** [26]. Центральная часть поля с координатами центра $09^{\text{h}}50^{\text{m}}00^{\text{s}} + 47^{\text{d}}35^{\text{m}}00^{\text{s}}$ размером 2.4 кв. градуса была **покрыта** четырьмя наборами экспозиций...». Лучше написать «с предельно большим накоплением сигнала от рентгеновского спутника ...» и “перекрыта”.
6. На стр. 40. «Важно иметь хорошую калибровку, т.к. ошибки в отдельных диапазонах могут **иммитировать** спектральные детали». Лучше использовать русский термин – создавать ложные
7. На стр. 63. Не удачное выражение «Слабый конец сложно изучать ... ».

5. Общее заключение о диссертации Котова С. С.

Представленная диссертационная работа Котова С. С. является законченной работой. Автором получен значительный объем новых наблюдательных данных, который обработан и проанализирован. Основные положения диссертации, вынесенные на защиту, являются новыми, хорошо аргументированы и не вызывают сомнения. Определен личный вклад автора в работу. Диссертация изложена лаконично и в тоже время понятно и четко.

Отмеченные в небольшом количестве замечания в диссертации по существу являются стилистическими. Я положительно и высоко оцениваю выполненную работу, которая продемонстрировала, что Котов С. С. значительно превысил количественно и качественно необходимые требования, предъявляемые для кандидата физико-математических наук и состоялся как ученый, умеющий планировать и осуществлять наблюдения, обрабатывать и анализировать полученный материал, с привлечением данных, опубликованных в научной литературе, создавать, развивать и применять к наблюдательным данным необходимые модели. Результаты исследований опубликованы в 6-ти специализированных журналах и, следовательно, прошли экспертную оценку. Они докладывались лично диссертантом или представлялись соавторами на 14-ти международных и российских конференциях.

Оформление диссертации и автореферата соответствует требованиям ВАК. Автореферат адекватно отражает основное содержание диссертации.

Все сказанное выше дает мне основание утверждать, что диссертационная работа Котова С. С. «Поиск активных ядер галактик и изучение их физических свойств по данным среднеполосного фотометрического обзора на 1-м телескопе Шмидта» представляет собой законченное исследование, которое в полной мере соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Котов С. С. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.03.02 – Астрофизика и звездная астрономия

гнс отдела «Физики Солнца и Солнечной системы»
Крымской астрофизической обсерватории РАН,
доктор физ.-мат. наук

Н.Н. Киселев

Подпись Н. Н. Киселева заверяю:

Директор
Крымской астрофизической обсерватории,
канд. физ.-мат. наук



А. Н. Ростопчина-Шаховская

12 сентября 2022 г.

Киселев Николай Николаевич
298409 п. Научный, д. ба, кв. 17, Бахчисарайский район, Республика Крым
ФГБУН «Крымская астрофизическая обсерватория РАН»
Главный научный сотрудник. Тел. +7(978)1162998
kiselevnn42@gmail.com