

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(САО РАН)



Научная квалификационная работа

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

Аспирант

Научный руководитель к.ф.-м.н. Додонов С.Н.

Подразделение

Котов С.С.

Додонов С.Н.

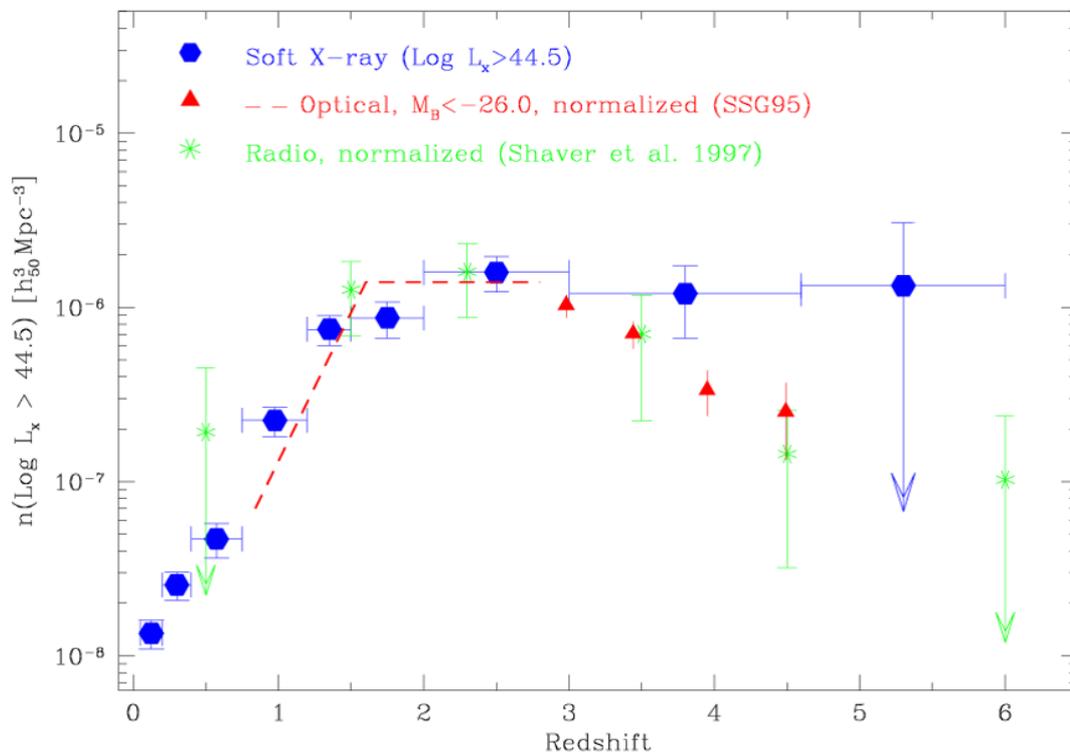
ЛСФВО

Направление 03.06.01 Физика и астрономия

Профиль 01.03.02 Астрофизика и звездная астрономия

Нижний Архыз 2021

Введение



За последнее время удалось достичь существенного продвижения в понимании космологической эволюции функции светимости AGN. По наблюдениям в оптическом и рентгеновском диапазонах пространственная плотность быстро растет от $z = 0$ до $z = 2$, а на более высоких красных смещениях, $z > 3$, начинает падать. При этом, наблюдаются существенные различия в пространственной плотности квазаров по данным в оптике, рентгене и радиодиапазоне (Miyaji et al. 2000). Уменьшение числа квазаров, отобранных в оптическом диапазоне, может быть вызвано увеличением доли поглощенных объектов среди полного числа AGN и селекционными эффектами.

Цели и задачи

Основной целью научного исследования является изучение эволюции активных ядер галактик и построение их функции светимости в диапазоне красных смещений $0.1 < z < 5$.

Задачи, которые необходимо было решить для достижения указанной цели:

- На основе наблюдательных данных, полученных на 1-м телескопе Шмидта Бюраканской обсерватории, провести анализ пространственного распределения квазаров поля HS47.5-22 площадью 2.386 кв. гр. до $z \sim 5$, и построить их функцию светимости. Провести сравнение с результатами работ других авторов.
- Разработать методику отбора квазаров по данным среднеполосной фотометрии, полученным на 1-м телескопе Шмидта БАО. Создать 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, влияющих на полноту выборки квазаров в работах других авторов, оценить селекционные эффекты полученной нами выборки.

Научная новизна

- Впервые были получены среднеполосные фотометрические наблюдательные данные для однородного поля HS 47.5-22 площадью 2.38 кв. гр. до $R_{AB} = 22.5^m$.
- Разработан новый алгоритм отбора кандидатов в квазары, использующий как данные среднеполосной и широкополосной фотометрии на 1-м телескопе Шмидта, так и данные других оптических, инфракрасных, рентгеновских и радио обзоров.
- Произведен отбор кандидатов в квазары в поле площадью более 2.38 кв. гр., до $R_{AB} = 22.5^m$ оценена эффективность применения алгоритма для задач отбора квазаров и поиска необычных объектов.
- Создан однородный до $R_{AB} = 22.5^m$ каталог кандидатов в квазары из более чем 700 объектов.
- Проведено оптическое отождествление 144 объектов обзора ROSAT в поле HS 47.5-22.

Актуальность, научная и практическая значимость

Экспериментальные сведения о росте сверхмассивных черных дыр во Вселенной получают из исследования функции светимости активных ядер галактик в различных диапазонах длин волн. По наблюдениям в оптическом и рентгеновском диапазонах стало ясно, что их пространственная плотность быстро растет от $z=0$ до $z \sim 2$, а на более высоких красных смещениях, $z > 3$, начинает падать (Уеда и др., 2003, Барджер и др., 2005). Однако данные о падении пространственной плотности AGN на высоких красных смещениях не являются вполне надежными и не подтверждаются небольшой (155 объектов с $z > 3.1$) выборкой обзора COSMOS, (Masters et al., 2012). Уменьшение числа квазаров, отобранных в оптическом диапазоне, может быть вызвано увеличением доли поглощенных объектов, среди полного числа AGN и селекционными эффектами.

Актуальность исследования обусловлена тем что данная работа нацелена на уточнение распределения пространственной плотности активных ядер галактик и построения их функции светимости на основе хорошо определенной выборки активных ядер галактик на различных космологических красных смещениях ($0.1 < Z < 5$).

Научная и практическая значимость :

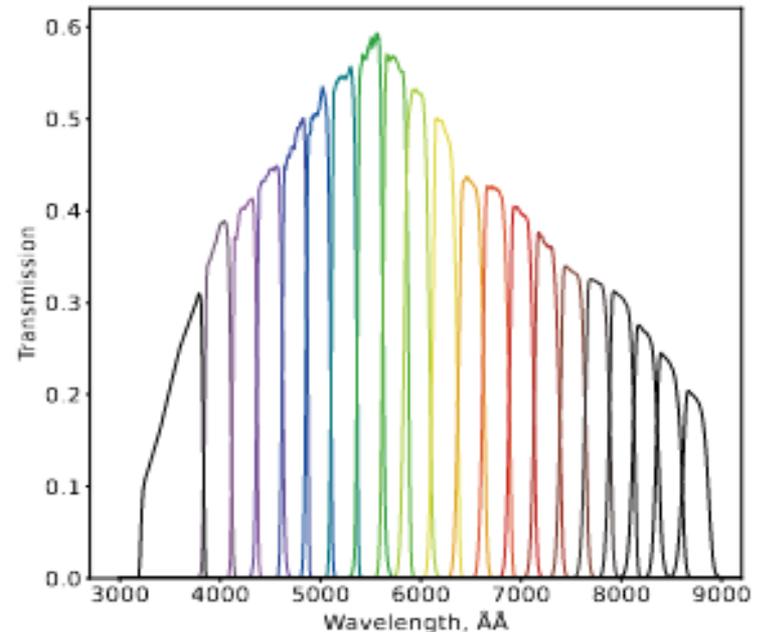
Полученный в ходе работы каталог квазаров с фотометрическими красными смещениями является актуальным для анализа пространственной плотности квазаров и построения их функции светимости для изучения эволюции активных ядер галактик;

Отождествление рентгеновских источников в оптике стало особо актуальным с запуском космической обсерватории «Спектр-РГ», одним из приоритетных направлений наблюдений которой являются активные ядра галактик. Отработка методики отождествления рентгеновских объектов обзора ROSAT по наблюдениям в среднеполосных фильтрах позволит существенно ускорить и повысить качество отождествления и определения природы новых рентгеновских объектов обзора обсерватории «Спектр-РГ»;

Наблюдения, обработка данных.

Поле зрения телескопа с детектором 4k x 4k CCD составляет 58 x 58 угловых минут, масштаб 0.868 угловых секунд / пиксель. Наблюдения проводились в 4 широкополосных фильтрах (u, g, r, i SDSS) и в 16 среднеполосных фильтрах (FWHM=250 Å). Суммарное время экспозиции на фильтр варьируется от 60 до 120 минут в зависимости от спектральной чувствительности детектора.

Filter	lambda_cen, Å	FWHM (Å)	m_lim,5sigma
u_SDSS	3578	338	24.23
g_SDSS	4797	860	25.22
r_SDSS	6227	770	24.97
i_SDSS	7624	857	24.15
MB_400	3978	250	24.37
MB_425	4246	250	24.31
MB_450	4492	250	24.20
MB_475	4745	250	24.31
MB_500	4978	250	24.30
MB_525	5234	250	24.37
MB_550	5496	250	23.86
MB_575	5746	250	24.29
MB_600	5959	250	23.89
MB_625	6234	250	23.51
MB_650	6499	250	23.41
MB_675	6745	250	23.78
MB_700	7002	250	23.47
MB_725	7253	250	23.20
MB_750	7519	250	23.07
MB_775	7758	250	22.97



Набор среднеполосных фильтров, использованных в наблюдениях, с учётом спектральной чувствительности детектора.

Наблюдения, обработка данных.

Поле HS47.5-22

RA = 09^h50^m00^s DEC = +47^d35^m00^s

Мозаика из 4 x 1 кв. град.
с перекрытиями 10 угл. минут.
Итоговый размер **2.38** кв. град.

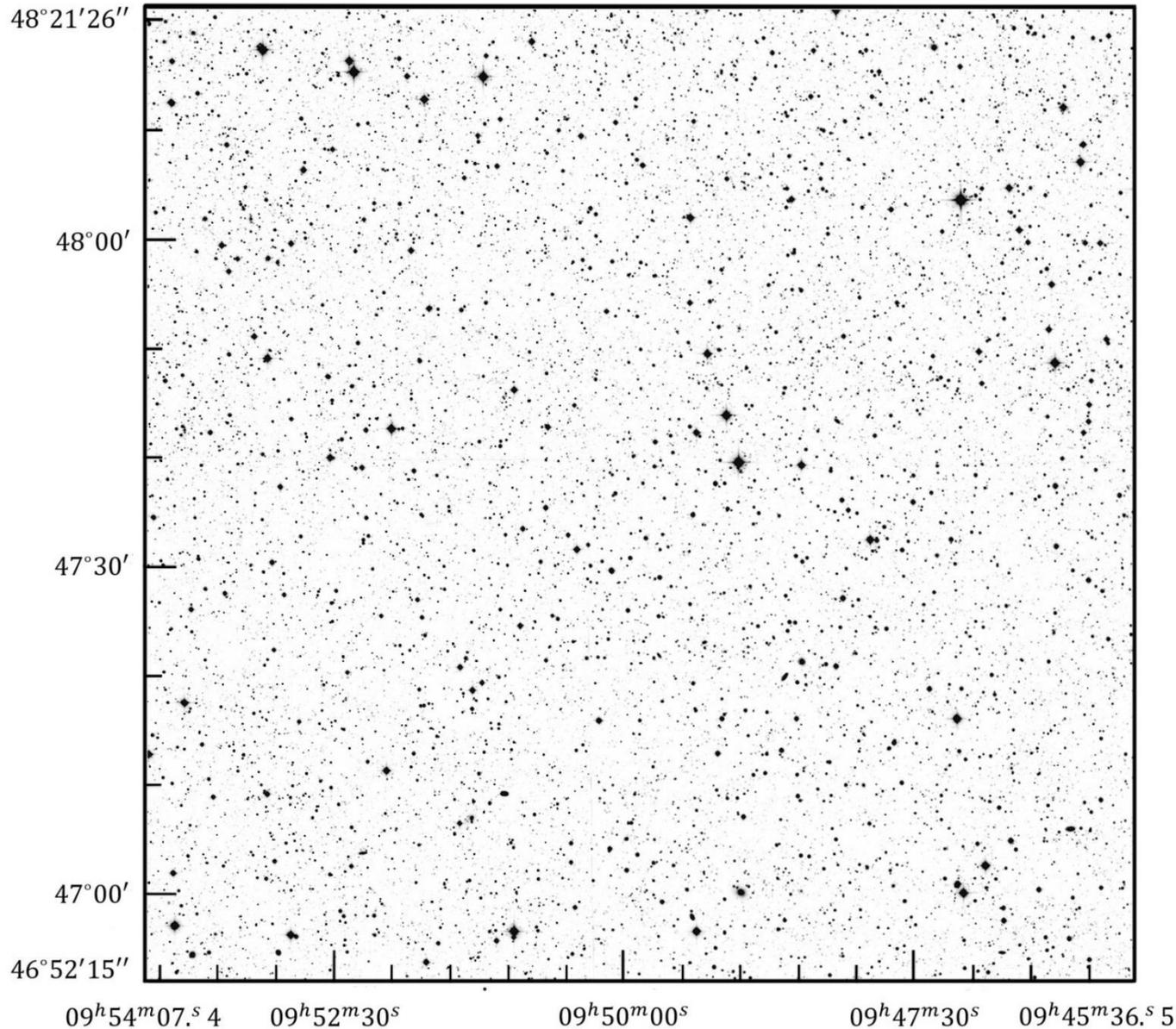
16 среднеполосных фильтров
с FWHM = 250 Å.
4 широкополосных фильтра SDSS

Однородное покрытие
спектрального диапазона
4000 - 8000 Å,
S/N ~ 5 для AB=23^m во всех
среднеполосных фильтрах.

144 объектов ROSAT до $3.5 \cdot 10^{-14}$
эрг*см⁻²*с⁻¹

362 объектов FIRST

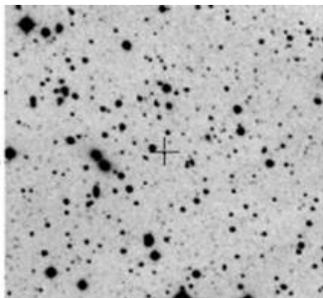
236 Квазара SDSS



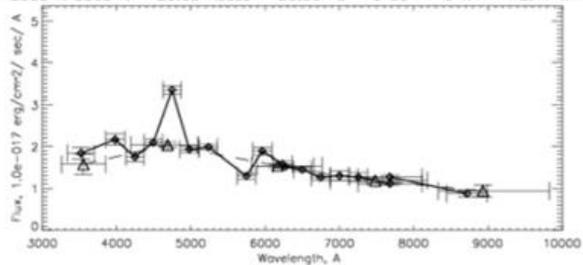
Среднеполосные спектральные распределения энергии

Object N : 16433

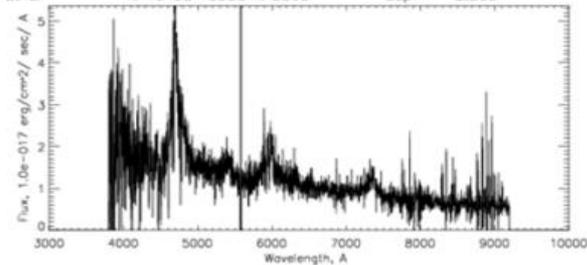
00:16:26.75
16:04:29.86



N 16433 SDSS N 5365 R = 20.65 Rsdss = 20.66 FL = 0 EC = 6 W1 = 18.41 W1-W2 = 2.42

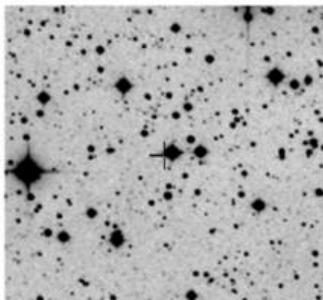


N 16433 SDSS N 5365 Zsp = 2.865

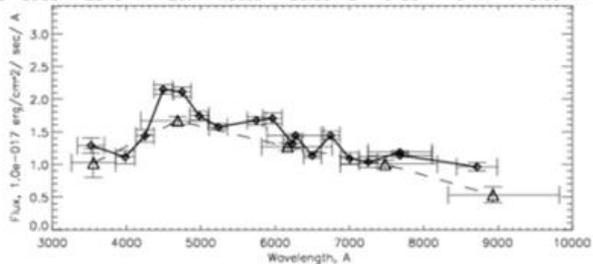


Object N : 17142

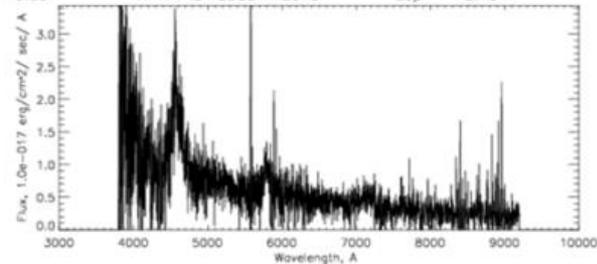
00:16:59.35
16:05:51.74



N 17142 SDSS N 2945 R = 20.71 Rsdss = 20.86 FL = 3 EC = 6 W1 = 0.00 W1-W2 = 0.00

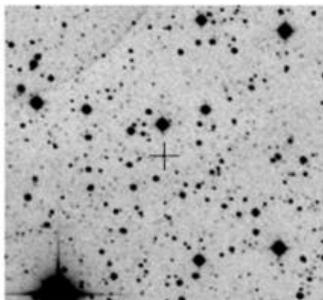


N 17142 SDSS N 2945 Zsp = 2.754

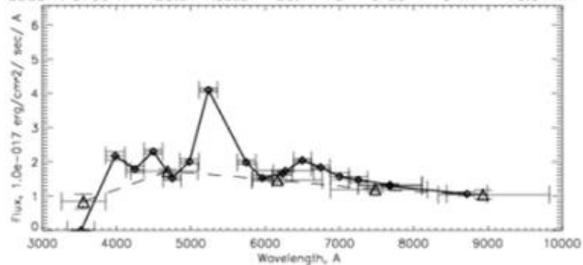


Object N : 19671

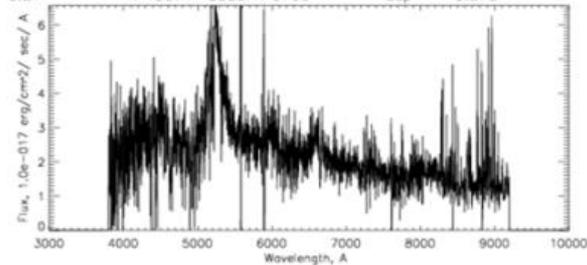
00:17:20.41
16:11:06.94



N 19671 SDSS N 5760 R = 20.51 Rsdss = 20.71 FL = 0 EC = 6 W1 = 16.91 W1-W2 = -0.21



N 19671 SDSS N 5760 Zsp = 3.278



Методика отбора квазаров.

Отождествление с обзорами DECaLS, UnWISE, SDSS.

Отбор по морфологическому признаку DECaLS: только точечные объекты

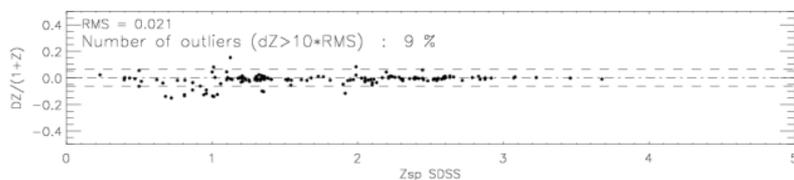
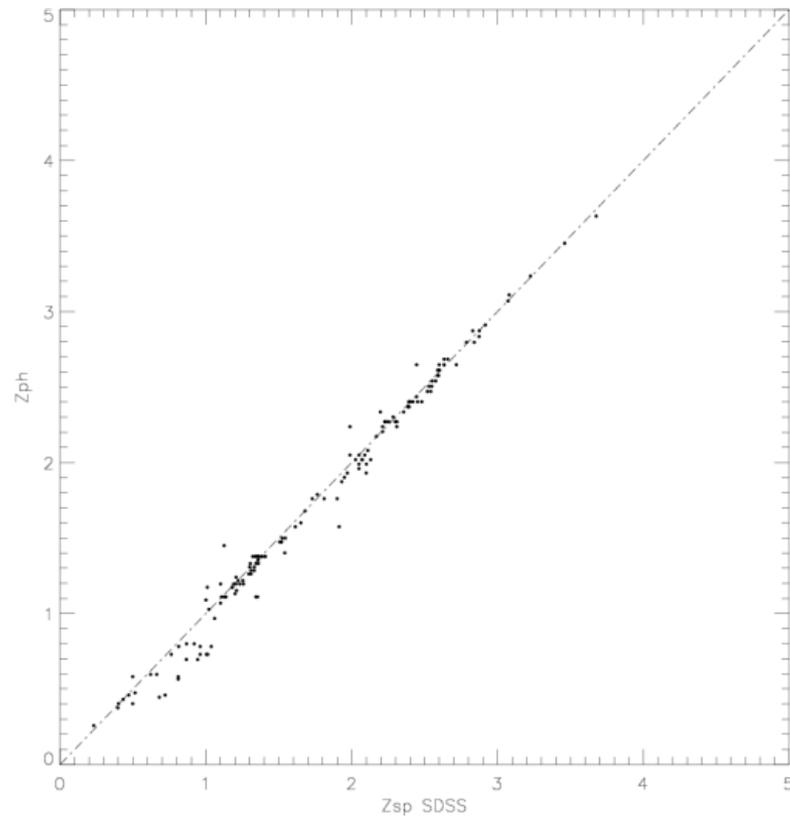
Отбор по широкополосным фотометрическим данным: плотность ближайших соседей в цветовом пространстве $[g, r, i, z]$ в комбинации с цветами $g - z$ и $W1 - W2$

Отбор по среднеполосным фотометрическим данным: построение SED, отбор кандидатов в квазары вручную

Определение фотометрических красных смещений: пакет ZEBRA, проверка корректности определения красных смещений вручную

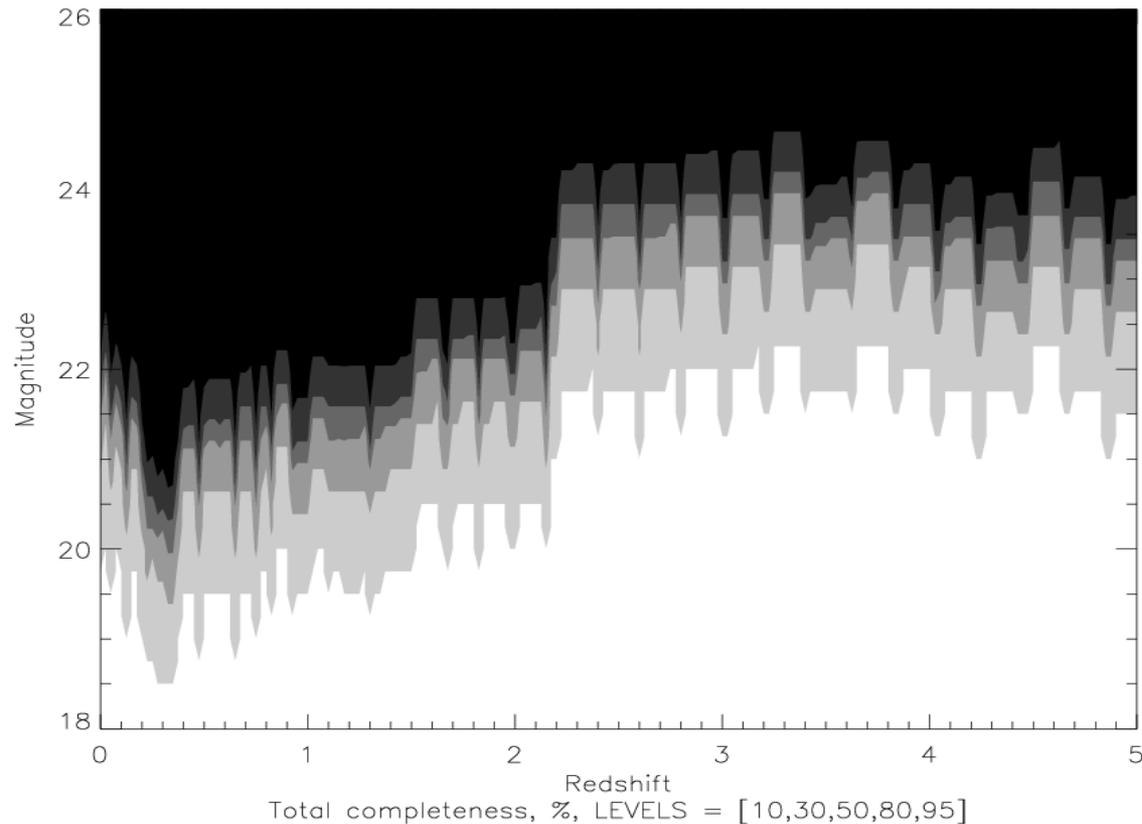
Подтверждение корректности отбора и определения красных смещений: спектроскопия отдельных объектов выборки на БТА

Определение фотометрических красных смещений



Отбор QSO-кандидатов проводился в два этапа : до $r=21.5^m$ в автоматическом режиме с использованием критериев кластеризации однотипных объектов и до $r=22.5^m$ в ручном режиме. Фотометрические красные смещения получены с использованием программы ZEBRA (Feldman et al., 2009) и набора синтетических темплейтов LePHare. Всего выделено 738 QSO-кандидатов с фотометрическими красными смещениями от $Z_{ph}=0.1$ до $Z_{ph} = 5.2$.

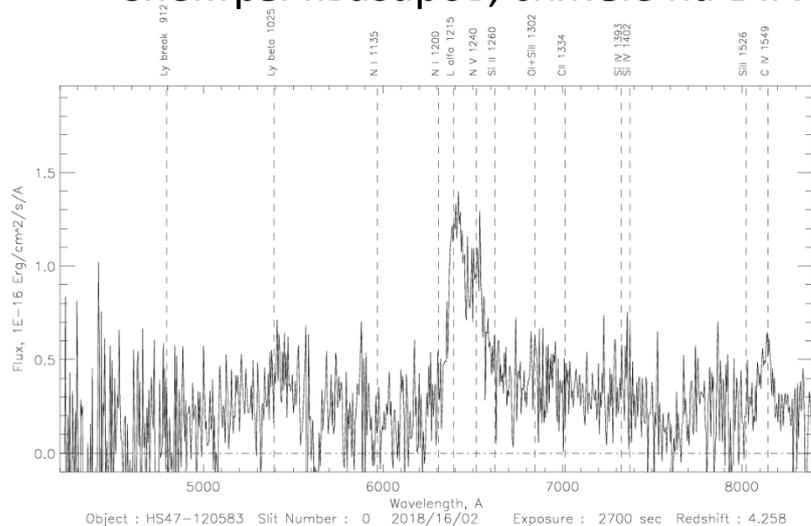
Методика отбора квазаров : полнота выборки.



Мы промоделировали процесс отбора кандидатов в квазары по широким эмиссионным линиям, регистрируемым в среднеполосных фильтрах. Модель использовала распределение эквивалентных ширин эмиссионных линий квазаров (Чилингарян 2003), и рассчитывала предел регистрации эмиссионных линий на уровне 3 сигма на разных красных смещениях. Рассматривались эмиссионные линии $\text{L}\alpha$, CIV , CIII , MgII , $\text{H}\beta$, $\text{H}\alpha$. Также учитывалось попадание эмиссионной линии между фильтрами. Результаты моделирования приведены на графике. Градацией цвета от белого к чёрному обозначены уровни полноты отбора в 95, 80, 50, 30 и 10 процентов, соответственно.

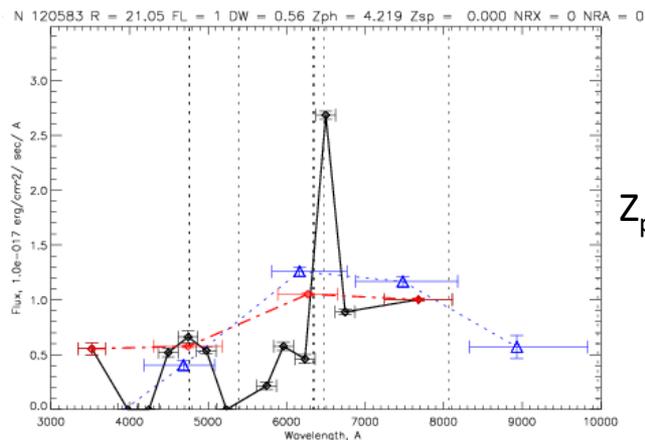
Спектроскопия квазаров на БТА

Спектры квазаров, снятые на БТА

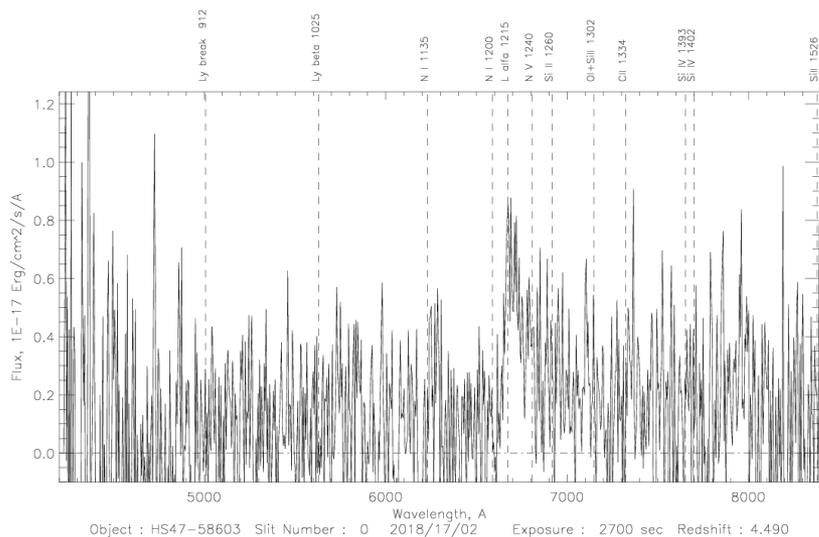


$Z_{sp} = 4.258$

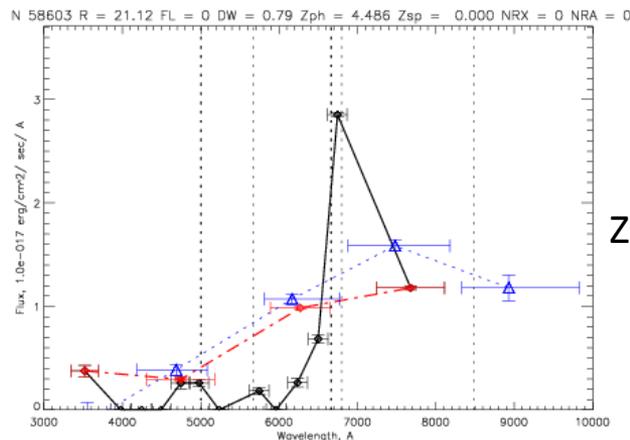
Среднеполосные распределения энергии квазаров



$Z_{ph} = 4.219$

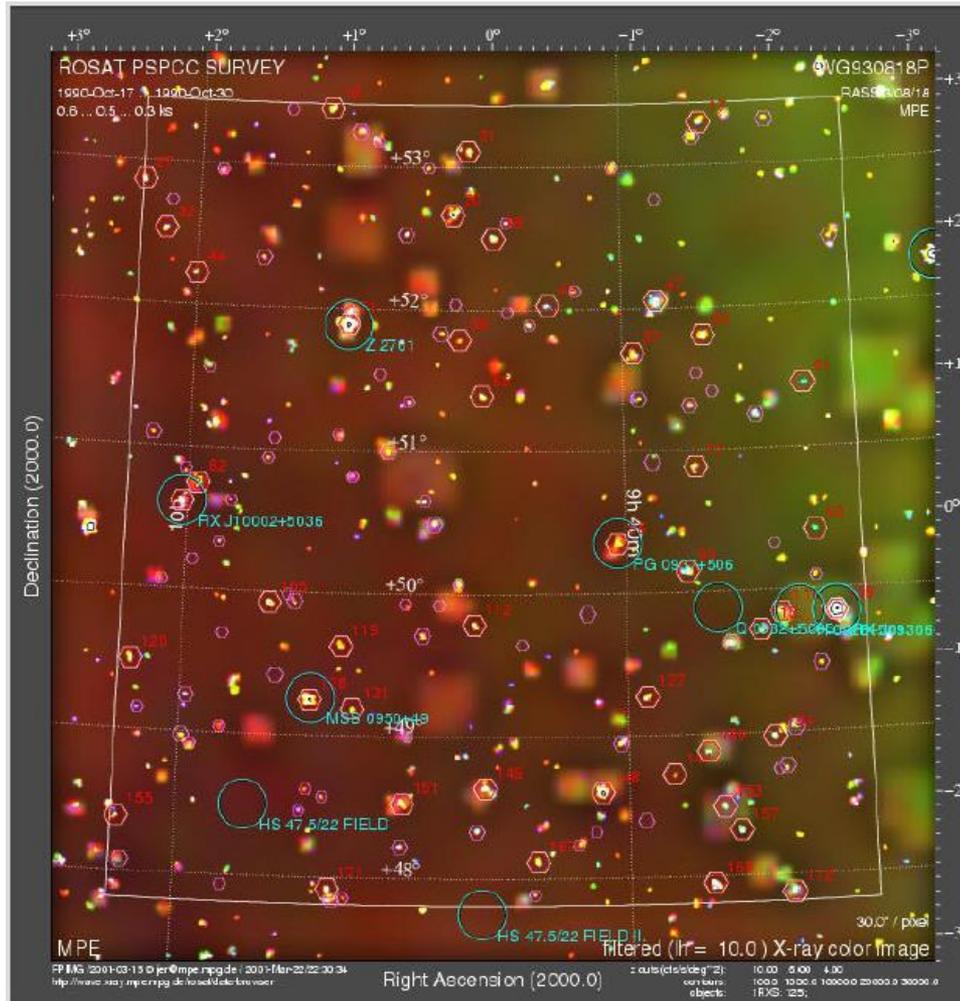


$Z_{sp} = 4.490$



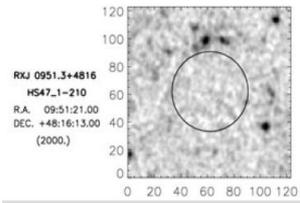
$Z_{ph} = 4.486$

Отождествление рентгеновских источников ROSAT

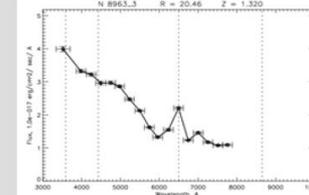
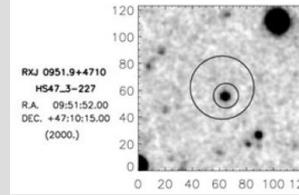


Карта поля HS47.5-22 в рентгеновском диапазоне. Суммарное время экспозиции > 5000 сек. для 73% площади и более 20000 сек. для центральной области размером 2.3 квадратных градуса. Поле находится в области с очень низкой плотностью нейтрального водорода на луче зрения

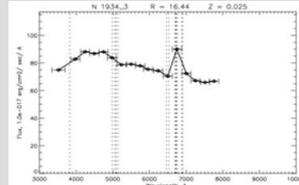
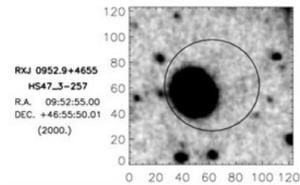
Отождествление рентгеновских источников ROSAT



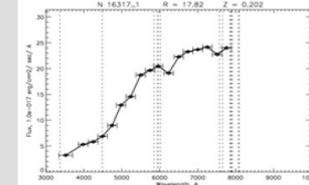
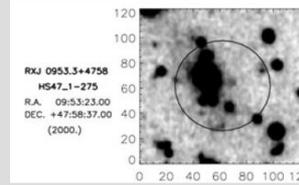
Пустое поле (объектов ярче $R_{AB}=24.97$ не обнаружено)



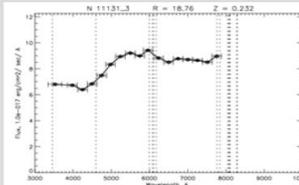
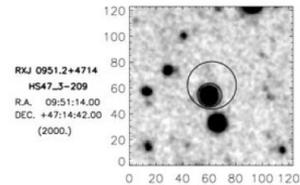
Квazar $Z=1.320$



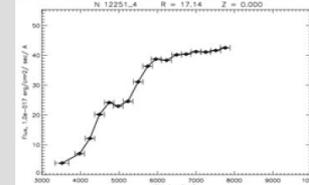
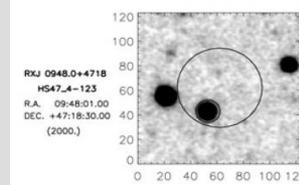
Яркая галактика
 $Z=0.025$



Скопление галактик
 $Z=0.202$

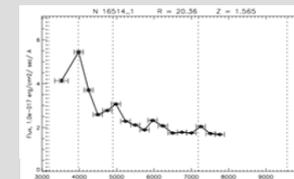


Галактика с эмиссией
 $Z=0.025$

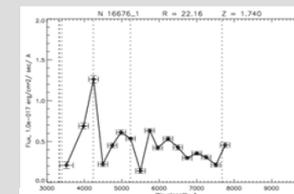
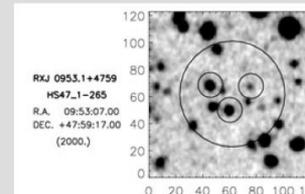


Звезда

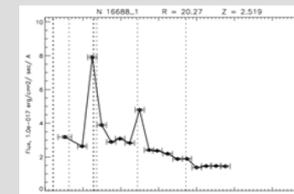
Single QSO	69
QSO + Em. Line Galaxy	19
Multiple QSO (2+)	11
Em. Line Galaxies (2+)	26
Galaxy Clusters	2
Single Star	4
Empty Field	2
Bright Stars	4
Just Detected	7



Квazar $Z=1.565$



Квazar $Z=1.740$



Квazar $Z=2.519$

Построение функции светимости квазаров

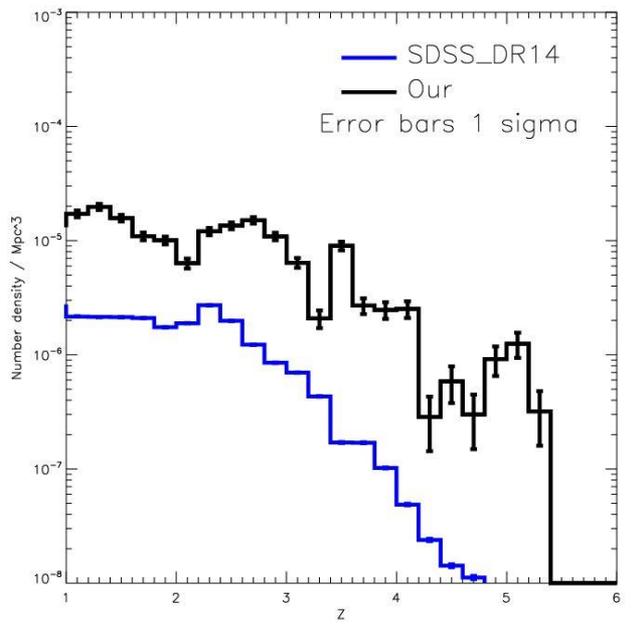
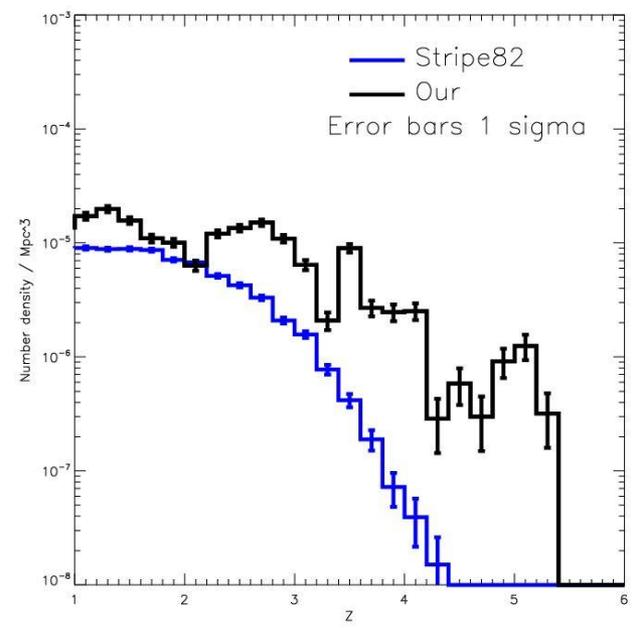
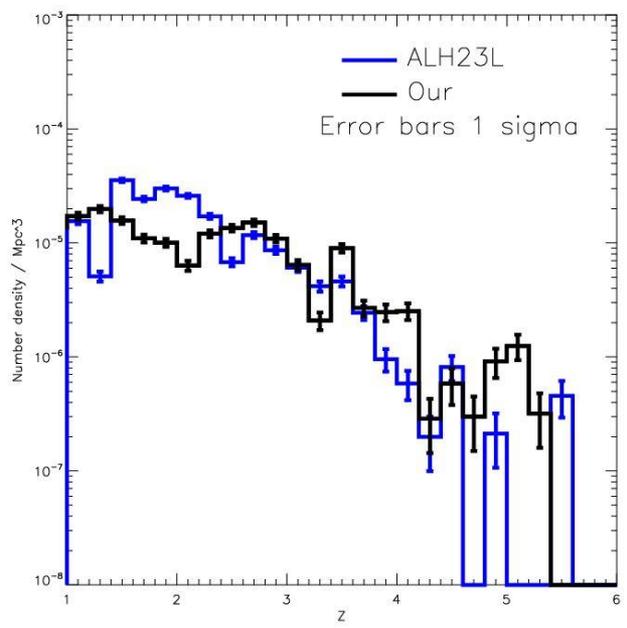
Создание каталога квазаров: фотометрия и красные смещения

Расчёт пространственной плотности квазаров: расчёт искривления пространства в рамках Λ -CDM модели, построение гистограммы зависимости пространственной плотности квазаров от красного смещения. Сравнение с результатами других обзоров

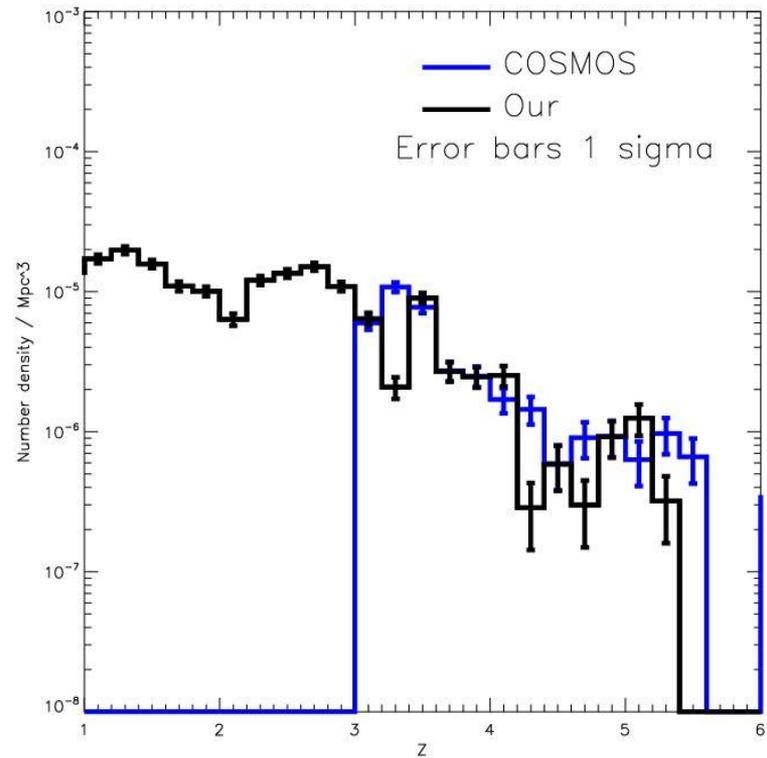
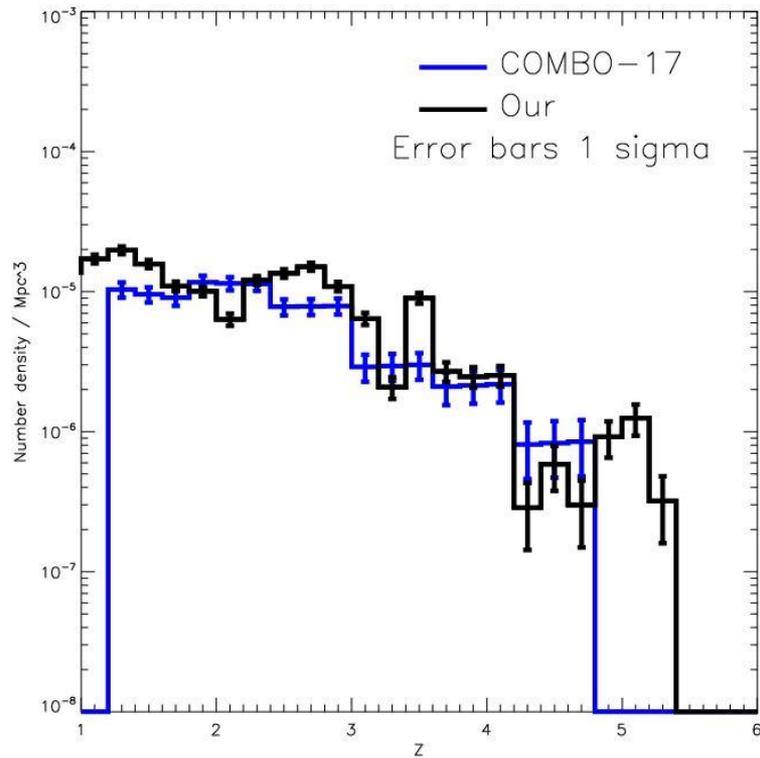
K-коррекция: расчёт абсолютной звёздной величины квазаров в системе покоя. Учёт красного смещения и искривления пространства в рамках Λ -CDM модели. Учёт межгалактического поглощения Мадау.

Построение функции светимости: построение графиков «пространственная плотность – светимость» для различных диапазонов красного смещения. Сравнение с результатами других обзоров.

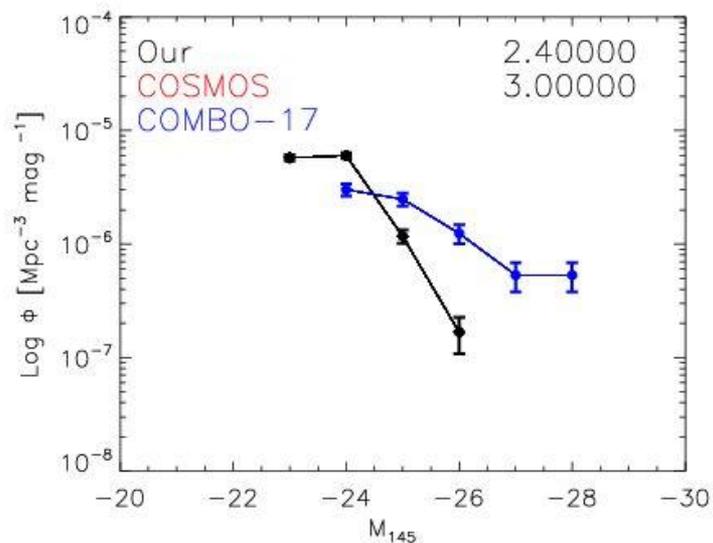
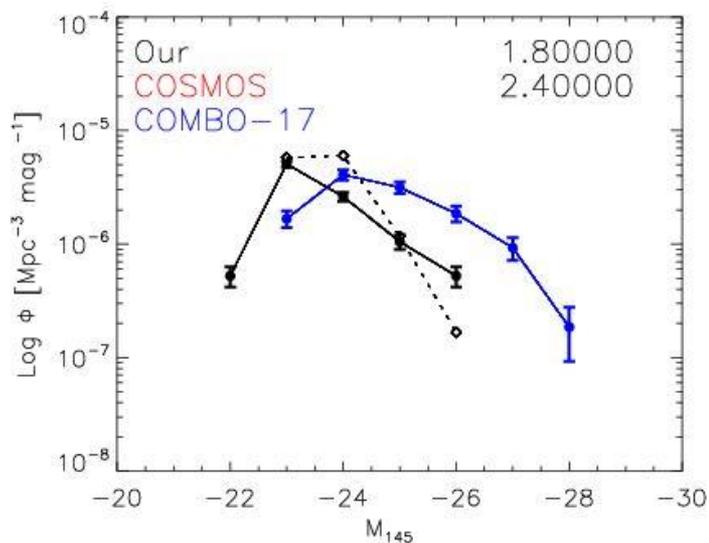
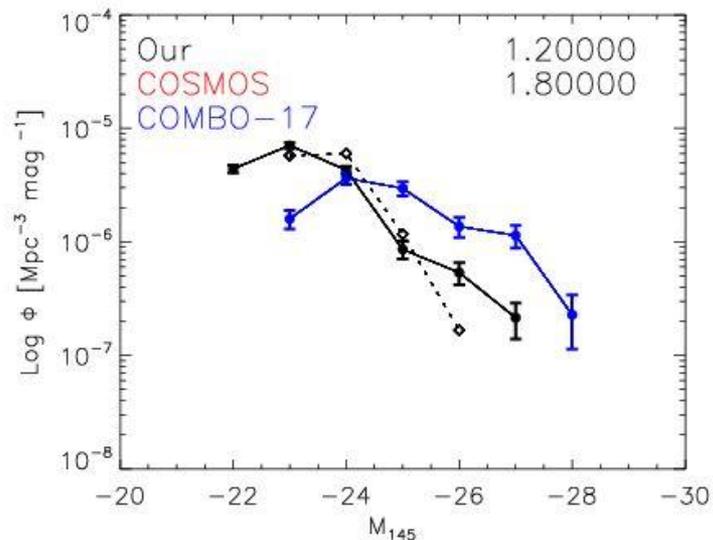
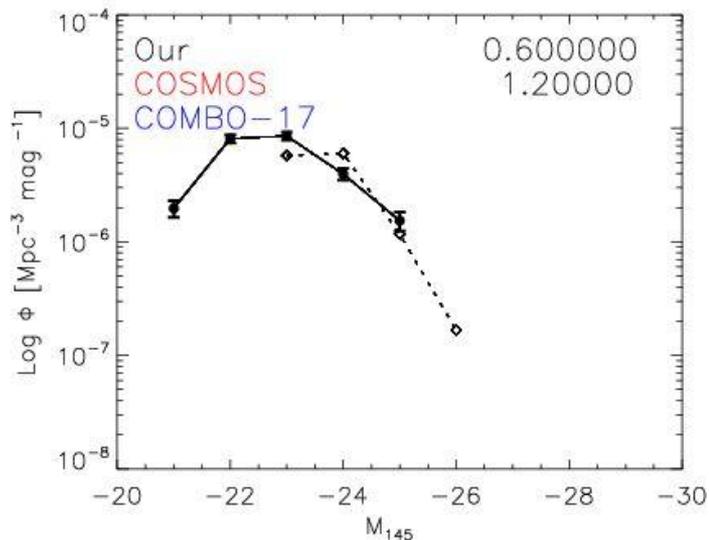
Расчёт пространственной плотности квазаров



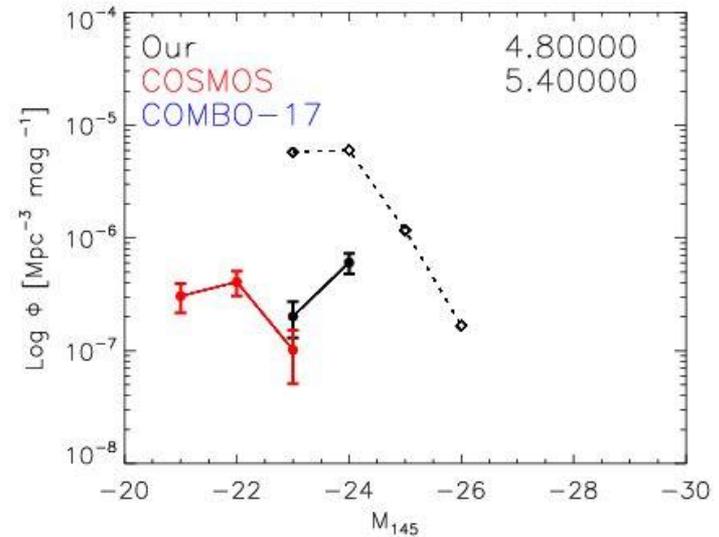
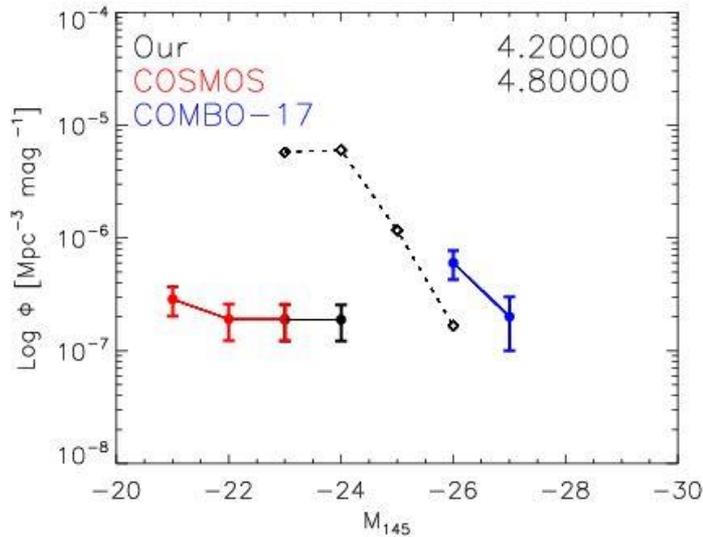
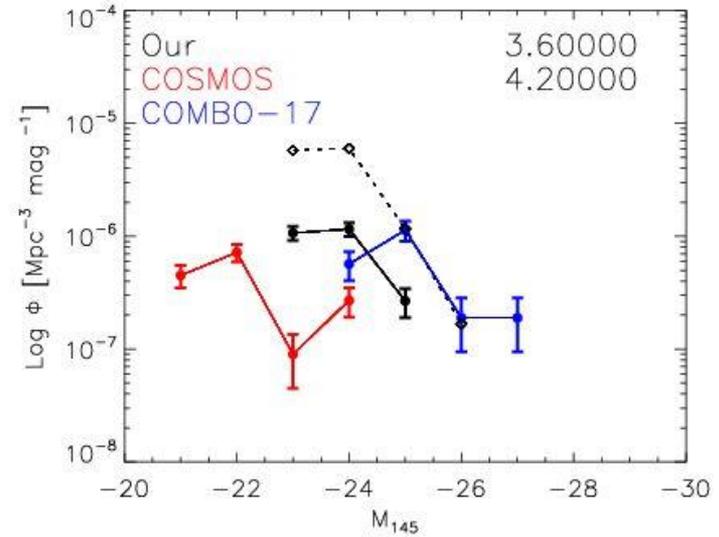
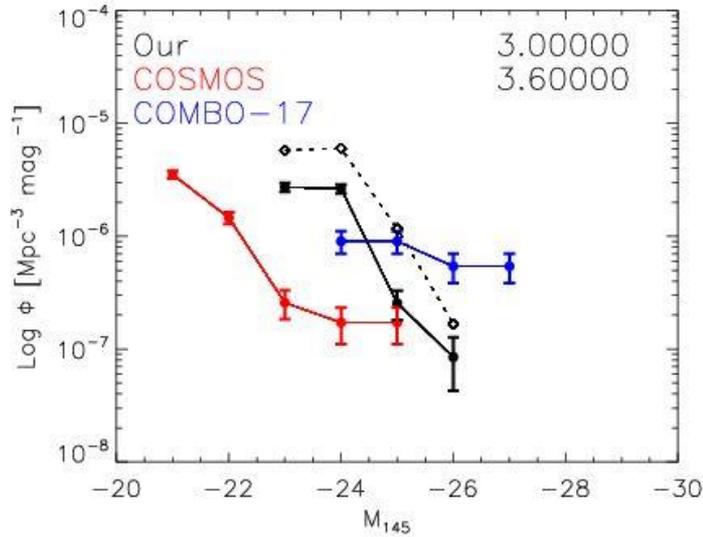
Расчёт пространственной плотности квазаров



Дифференциальная функция светимости в разных диапазонах красных смещений

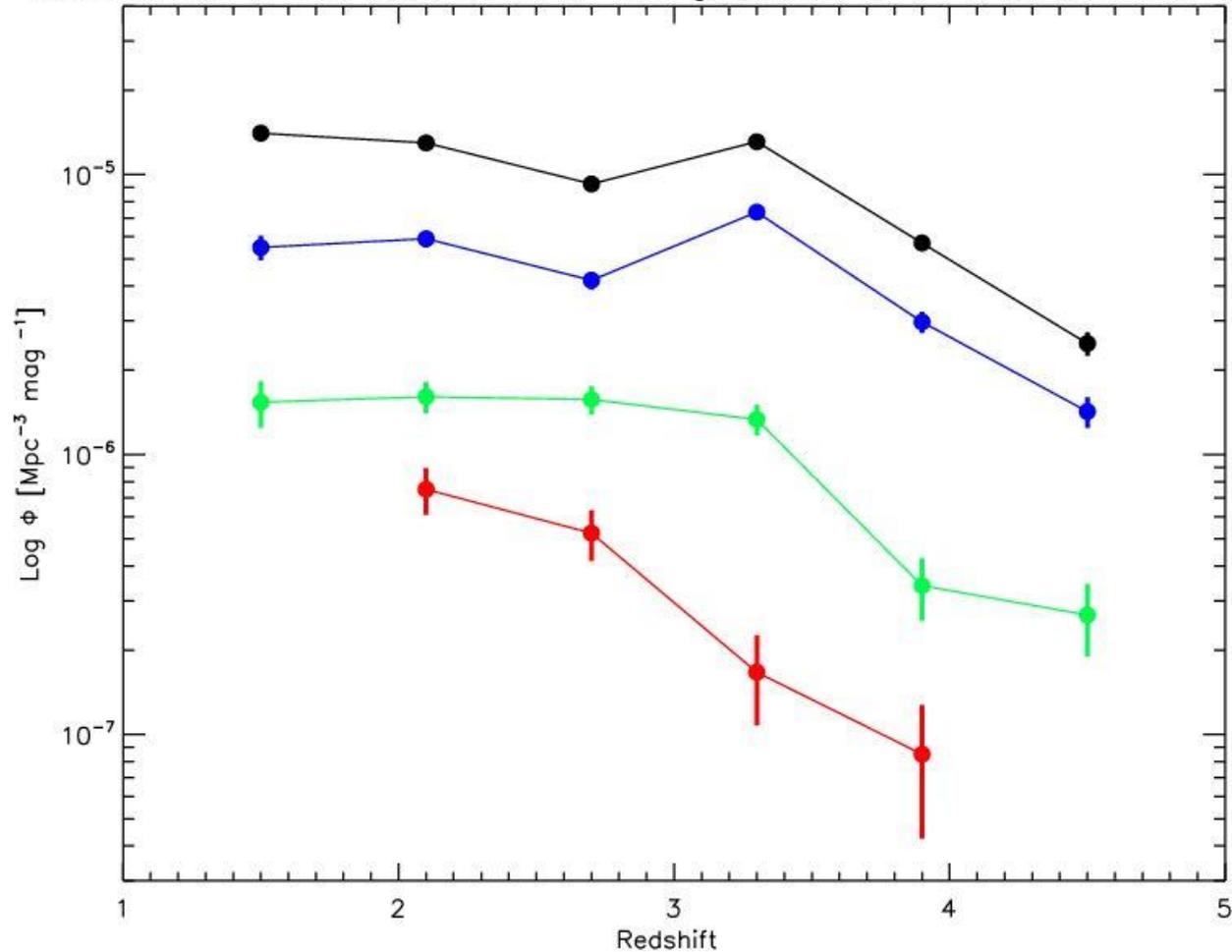


Дифференциальная функция светимости в разных диапазонах красных смещений



Пространственная плотность квазаров в разных диапазонах светимости

black: $M_{145} < -24$; blue: $M_{145} < -25$; green: $M_{145} < -26$; red: $M_{145} < -27$



Результаты

По нашим данным мы получили зависимость пространственной плотности квазаров от красного смещения, хорошо совпадающую с данными обзора COSMOS в диапазоне красных смещений $3 < z < 5$. По нашим данным, спад пространственной плотности квазаров начинается на $z = 3.0$, что хорошо согласуется с рентгеновскими данными. В то же время, в обзоре COMBO-17 спад начинается уже на $z = 2.6$, в обзоре ALHAMBRA – на $z=2.4$, в обзоре SDSS-DR14 – на $z = 2.5$, а в обзоре Stripe-82 – на $z = 2.0$. Данные различия мы связываем с тем, что при увеличении глубины обзора и улучшения качества отбора квазаров уменьшается влияние селекционных эффектов, и увеличивается полнота выборки на больших красных смещениях. Таким образом, можно предположить, что дальнейшее увеличение глубины отбора и уменьшение влияния селекционных эффектов на качество отбора сдвинет максимум пространственной плотности квазаров в сторону больших красных смещений.

Заключение

- Проведена модернизация 1-м телескопа Шмидта БАО НАН Армении;
- Проведен среднеполосный фотометрический обзор на 1-м телескопе Шмидта БАО. Разработан и отлажен алгоритм обработки полученных данных.
- Разработан и отлажен алгоритм отбора кандидата в квазары по среднеполосным и широкополосным фотометрическим данным, полученным на 1-м телескопе Шмидта БАО, а также по данным других обзоров.
- Проведено изучение статистических свойств полученной выборки квазаров, построена функция светимости, проведено сравнение с результатами работ других авторов.

Апробация работы

“*QSO Samples Properties Study*” (устный доклад)

fifth byurakan international summer school. 12-23 сентября 2016 г., Бюракан, Армения

“1-м телескоп Шмидта : первые результаты” (соавтор доклада)

“Оценка полноты выборки квазаров в Слоановском обзоре” (постер)

Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра – 2016. 20-23 декабря 2016 г., Москва

“Active galactic nuclei search” (устный доклад)

11th Serbian Conference on Spectral Line Shapes in Astrophysics. Šabac, Serbia, August 21-25, 2017

“1-м телескоп Шмидта БАО: первые результаты” (устный доклад)

Всероссийская астрономическая конференция 2017 года (ВАК-2017). 17-22 сентября 2017 г., Ялта

“Выборка квазаров в поле HS47.5-22” (соавтор доклада)

Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра – 2017. 18-21 декабря 2017 г., Москва

“Среднеполосный Бюраканский обзор: оценка селекционных эффектов” (устный доклад)

Актуальные проблемы внегалактической астрономии. Пущино, 24 – 27 апреля 2018

“Поиск квазаров с помощью среднеполосной фотометрии”

VII Пулковская молодежная астрономическая конференция. 28-31 мая 2018 г.

“Отбор квазаров по наблюдениям в среднеполосных фильтрах” (устный доклад)

Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра – 2018. 18-21 декабря 2018 г., Москва

Список публикаций по теме работы

Kotov, S.; Dodonov, S.

Active galactic nuclei search

Atoms, vol. 5, issue 4, p. 45

Movsessian, T. A.; Dodonov, S. N.; Gabrielyan, V. V.; Kotov, S. S.; Gevorgyan, M. H.

New Capabilities of One-Meter Schmidt Telescope of the Byurakan Astrophysical Observatory after modernization

ComBAO, Volume 64, Issue 1, p. 92-101

Dodonov, S. N.; Kotov, S. S.; Movsesyan, T. A.; Gevorkyan, M.

One-meter Schmidt telescope of the Byurakan Astrophysical Observatory: New capabilities

Bulletin, Volume 72, Issue 4, pp.473-479

Volnova, A.; Novichonok, A.; Pozanenko, A.; Kotov, S.; Movsesyan, T.; Mazaeva, E.

GRB 180205A: BAO optical observations.

GRB Coordinates Network, Circular Service, No. 22411, #1 (2018/February-0)

Личный вклад автора

- Участие в модернизации 1-м телескопа Шмидта БАО НАН : измерение кривых пропускания фильтров, изучение температурной стабильности ПЗС-детектора. Участие в балансировке телескопа, разработке системы освещения подкупольного экрана плоского поля. Участие в отладке системы наведения и ведения телескопа.
- Участие в проведении среднеполосного фотометрического обзора полей SA68 и HS47.22, около 50 наблюдательных ночей.
- Эксперименты с применением различных методов обработки изображений, полученных на 1-м телескопе, наравне с соавторами;
- Разработка методик автоматического отбора квазаров по данным широкополосной фотометрии, среднеполосной фотометрии, инфракрасных данных UnWISE, морфологии обзора DECaLS, данных о параллаксах и собственных движениях GAIA, а также по оптическим отождествлениям рентгеновских и радиоисточников. Написание программы для отбора квазаров по спектральным распределениям энергии вручную, определяющий вклад автора;
- Моделирование полноты отбора кандидатов в квазары по среднеполосным фотометрическим данным, определяющий вклад автора;
- Вычисление пространственной плотности квазаров, проведение к-коррекции, учёт межгалактического поглощения, построение функции светимости квазаров, определяющий вклад автора.

Спасибо за внимание!