

УДК 524.7

Г. Ю. Иващенко, О. В. Василенко

Київський національний університет імені Тараса Шевченка
вул. Володимирська 64/13, Київ, 01601
Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України
вул. Академіка Заболотного 27, Київ, 03680
g.ivashchenko@gmail.com

Кросс-кореляційна функція розподілу АЯГ I типу з SDSS DR7 та блакитних галактик WiggleZ

На основі власних вибірок активних ядер галактик (АЯГ) I типу та блакитних галактик з оглядів SDSS DR7 та WiggleZ DR1 отримано параметри їхніх кросс- та автокореляційних функцій (АКФ). Аналіз АКФ в реальному просторі показав наявність її більш крутого зламу для АЯГ, ніж для блакитних галактик, що узгоджується з еволюційною парадигмою, згідно з якою у близьку до нашого часу епоху основним населенням філаментів є галактики із зореутворенням, а АЯГ I типу формуються здебільшого тільки у скупченнях. На основі аналізу викривлення АКФ у просторі червоних зміщень отримано значення параметра $\gamma = 0.58 \pm 0.08$, що характеризує негабблівські рухи об'єктів до скупчень матерії, та параметра басса АЯГ I типу $b_{AGN} = 1.38 \pm 0.19$ для $\bar{z} = 0.65$, яка добре узгоджується з незалежними оцінками для одного з підкласів АЯГ I типу — квазарів, а також з даними для рентгенівських вибірок АЯГ різних типів.

КРОСС-КОРРЕЛЯЦИОННАЯ ФУНКЦИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АЯГ I ТИПА ИЗ SDSS DR7 И ГАЛАКТИК WIGGLEZ, Иващенко А. Ю., Василенко О. В. — На основании собственных выборок активных ядер галактик (АЯГ) I типа и голубых галактик из обзоров SDSS DR7 и WiggleZ DR1 получены параметры их кросс- и автокорреляционных функций (АКФ). Анализ АКФ в реальном пространстве показал наличие ее более крутого излома для АЯГ, чем для голубых галактик, что согласуется с эволюционной парадигмой, согласно которой в близкую к нашему времени эпоху основным населением филаментов являются галактики со звездообразованием, а АЯГ I типа формируются главным образом только в скоплениях. На основании анализа искривления

АКФ в просторстві красних смещений получено значення параметра $\beta = 0.58 \pm 0.08$, характеризуючого нехаббловские движения объектов к скоплениям материи, и параметр байеса АЯГ I типа $b_{AGN} = 1.38 \pm 0.19$ для $\bar{z} = 0.65$, который хорошо согласуется с независимыми оценками для одного из подклассов АЯГ I типа — квазаров, а также с результатами для рентгеновских выборок АЯГ различных типов.

CROSS-CORRELATION FUNCTION OF DISTRIBUTION FOR SDSS DR7 I-TYPE AGNS AND WIGGLEZ GALAXIES, by Ivashchenko G. Yu., Vasylenko O. V. — Using our samples of I-type Active Galactic Nuclei (AGN) and blue galaxies from SDSS DR7 and WiggleZ DR1 surveys we obtained parameters of their cross- and autocorrelation functions (ACF). Our analysis of the real-space ACF shows the presence of more steep break for AGNs than for blue galaxies, that is in agreement with their evolution paradigm, according to which in the late epoch filaments are mainly populated by galaxies with star formation while I-type AGNs are mainly formed in clusters. From the redshift-space distortion of the ACF we obtained the value of $\beta = 0.58 \pm 0.08$ which characterises infall of objects onto matter overdensities and the bias parameter for I-type AGN $b_{AGN} = 1.38 \pm 0.19$ for $\bar{z} = 0.65$, that agrees well with results of other authors for one of I-type AGN subclasses, quasars, and also with results for X-ray selected samples of different-type AGN.

ВСТУП

Дослідження двоточкових статистик розподілу для квазарів є складнішою задачею, аніж для галактик. Обумовлено це особливостями розподілу обох типів об'єктів по значеннях червоного зміщення і обмеженістю технічних можливостей використаних телескопів. Квазари є одними з найяскравіших об'єктів Всесвіту, їхні огляди містять об'єкти до $z \sim 5-6$ з піком розподілу на $z \sim 2$, причиною чого є особливості їхньої еволюції. З іншого боку, хоча звичайні галактики спостерігаються глибокими олівцевими оглядами до таких самих z , пік їхнього розподілу в сучасних великих оглядах червоних зміщень припадає на $z = 0.1...0.2$, оскільки «неактивні» галактики мають набагато нижчу світність. Таким чином, для задачі розподілу галактик зазвичай використовуються вибірки, що містять сотні тисяч об'єктів у вузькому діапазоні z , а отже, у відносно невеликому об'ємі, а у випадку квазарів йдеться про вибірки, на порядок менші за кількістю об'єктів, які до того ж розподілені у набагато ширшому діапазоні z .

Для статистичного аналізу кластеризації позагалактичних об'єктів застосовують двоточкову кореляційну функцію їхнього розподілу (r) , яку можна порівняти з відповідною функцією для темної матерії (ТМ), обчисленою з результатів чисельного моделювання. Вона ви-

значає ймовірність P для будь-якого об'єкта з вибірки з концентрацією n знайти сусіда в елементі об'єму V на відстані r [40]:

$$P = n[V - (r)] V.$$

Функцію (r) називають автокореляційною функцією (АКФ). У випадку вибірки невеликого розміру, і відповідно невеликої концентрації об'єктів, успішно застосовується крос-кореляційна функція (ККФ) цих об'єктів з об'єктами іншого типу, вибірка яких має у декілька разів більший розмір. За означенням ККФ $_{AB}(r)$ об'єктів типів А та В визначає спільну ймовірність знайти на відстані r один від одного об'єкт А в елементі об'єму V_A та об'єкт В в елементі V_B як

$$P = n_A n_B [1 - _{AB}(r)] V_A V_B,$$

де n_A, n_B — концентрації об'єктів у вибірках А та В відповідно. На практиці КФ оцінюють з надлишку пар об'єктів з різною відстанню між її членами у реальній вибірці порівняно з так званим «випадковим каталогом», що містить об'єкти з випадковими координатами в об'ємі реальної вибірки і має повторювати її неоднорідність, пов'язану з особливостями спостережень.

Хоча постулюється, що розподіл світної матерії відтворює форму розподілу темної, їхні амплітуди різні, що описується так званим параметром баеса. У наближенні лінійного баеса, яке є справедливим для обмеженого діапазону відстаней, АКФ об'єктів типу А пов'язана з АКФ для темної матерії як $_{A}(r) = b_A^2 \text{TM}(r)$, а у випадку ККФ це співвідношення приймає форму $_{AB}(r) = b_A b_B \text{TM}(r)$, де b_A та b_B — параметри баеса для об'єктів відповідних типів. Таким чином, маючи ККФ для об'єктів двох типів і АКФ для одного з них, можна отримати АКФ розподілу об'єктів другого типу [9]:

$$_{B}(r) = [_{AB}(r)]^2 / _{A}(r). \quad (1)$$

Зазвичай ККФ застосовується для двох задач. Перша задача пов'язана з відносним розподілом об'єктів двох типів і їхніми негабблівськими рухами, наприклад галактик з різними світністю і кольором [8, 12, 49, 52], галактик, видимих у субміліметровому і оптичному діапазонах [4], оптичному і рентгенівському [9], квазарів і яскравих червоних галактик (LRG) [36], квазарів і звичайних галактик [2, 11]; або з різними розподілами і пекулярними рухами галактик, видимих в інфрачервоному [35], оптичному [10, 29, 50, 53] діапазонах, а також рентгенівському [6] (які здебільшого є АЯГ) навколо груп і скупчень галактик. Слід зауважити, що коли мова йде про галактики різних типів, то на великих масштабах, у так званому режимі двох гало (коли члени пари об'єктів належать різним гало ТМ), об'єкти є добре перемішаними, тобто співвідношення (1) має виконуватись завжди, а на малих масштабах (в режимі одного гало) така умова є необов'язковою, і ККФ галактик двох типів може бути меншою за середнє геометричне їхніх АКФ, що говоритиме про наявність окремих гало, населених об'єктами лише одного типу.

Друга задача полягає у відновленні АКФ об'єктів одного типу на основі співвідношення (1) із її ККФ з об'єктами іншого типу, наприклад квазарів із їхнім ККФ з LRG [39], рентгенівських АЯГ із їхнім ККФ з оптичними галактиками [9] або LRG [30, 33]. Використання цього методу дозволяє уникнути впливу суттєвого дробового шуму при підрахунку АКФ об'єктів з вибірки невеликого розміру. Окрім того, деякі з оцінок ККФ дозволяють використовувати випадковий каталог лише для однієї з двох вибірок (більшої), тим самим знімаючи проблему складності побудови випадкового каталогу для вибірки з погано визначеною функцією селекції і т. д., як для рентгенівських джерел [30, 33].

ВИБІРКИ

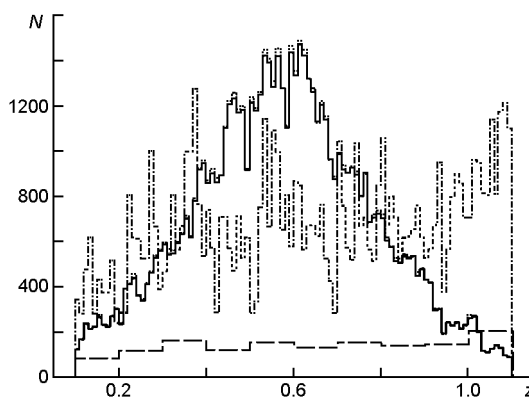
Блакитні галактики. Вибірку блакитних галактик створено з першого видання огляду WiggleZ (WiggleZ DR1) [17]. WiggleZ — це спектроскопічний огляд 240 тис. галактик з емісійними лініями, виконаний за допомогою спектрографа AAOmega англо-австралійського 3.9-м телескопа. Головною метою огляду є вимірювання масштабів піку баріонних акустичних осциляцій 4-8 млрд років тому, що відповідає медіані червоного зміщення огляду $z_{med} = 0.6$. Кандидати для спектроскопії відбирались з УФ-огляду космічного телескопа GALEX [2], які мають потік у близькому УФ-діапазоні не нижче 22.8^m , а також спостерігаються в оптичному діапазоні із $20.0^m < m_r < 22.5^m$. Червоне зміщення 90 % галактик огляду лежить в діапазоні $0.2 < z < 1.0$. Область покриття небесної сфери оглядом складається із семи окремих полів з площею 100...200 град². До першого видання огляду, який на даний момент є публічно доступним, увійшли 81362 галактики. Для дослідження було обрано діапазон червоних зміщень $0.1 < z < 1.1$ (середнє $\bar{z} = 0.58$), кількість об'єктів в якому склала 66970.

Активні ядра галактик I типу. До першого типу активних ядер галактик (АЯГ) належать об'єкти з широкими емісійними лініями: квазари, сейфертівські галактики I типу (SyI) та радіогалактики з широкими емісійними лініями (BLRG). Наша вибірка АЯГ I типу, яка включає лише квазари і SyI, була сформована із сьомого видання Слоанівського цифрового огляду неба (SDSS DR7) [1], яке містить 105783 об'єкти, автоматично класифіковані як квазари за спектрами. З них в області покриття небесної сфери вибіркою галактик з WiggleZ і з діапазоном червоних зміщень $0.1 < z < 1.1$ виявилось 1610 об'єктів, з яких після візуальної перевірки зображень лишилось 1590. При цьому було відкинуто «фальшиві» об'єкти (здебільшого флуктуації фону, ідентифіковані як точкові об'єкти) та «фальшиві» парні об'єкти (які насправді є одним об'єктом, який потрапив у каталог двічі з координатами, що різняться у 5-6 знаку після коми, з двох експозицій того самого поля).

З відібраних об'єктів 1268 містяться у п'ятому виданні каталогу квазарів Шнайдера та ін. [46], створеного командою SDSS з сьомого видання огляду. До нього увійшли об'єкти, яскравіші за $M_i = -22^m$, які мають хоча б одну емісійну лінію з шириною понад 1000 км/с або комплекс ліній поглинання, достовірне червоне зміщення і є слабкішими за $m_i = 15^m$. Останні — далекі квазари з L -лісом. До каталогу не увійшли такі об'єкти, як SyI, які мають такі ж спектри (а отже і колор-індекси), як і квазари, але умовно відрізняються від них за абсолютною зоряною величиною. Тому для доповнення вибірки сейфертівськими галактиками I типу було перевірено спектри інших 322 об'єктів, які не увійшли до каталогу [46]. З них до робочої вибірки додано 167 об'єктів, до яких входять як SyI, так і квазари, які з якихось причин не потрапили до каталогу [46]. З відкинутих об'єктів 123 об'єкти — АЯГ II типу (з вузькими емісійними лініями), 10 BLRG, 11 «нормальних» галактик, одна галактика, що пройшла стадію спалаху зореутворення (post-starburst galaxy, цікавий об'єкт зі спектром, типовим для зірок ранніх спектральних класів, але із зсувом у довгохвильову область, який відповідає $z = 0.5$), одна зоря пізнього спектрального класу та дев'ять об'єктів із низьким відношенням сигнал-шум, які важко піддаються класифікації.

З 1435 відібраних об'єктів 1276 є в каталозі «уточнених» червоних зміщень квазарів SDSS DR7, що обчислені за схемою Хьюїта і Вайлд [23], і згідно з оцінками авторами каталогу мають систематичну похибку, у 20 разів меншу за виміряну стандартними методами, що застосовуються в огляді SDSS. Насправді до цього каталогу увійшли не тільки квазари, а і такі об'єкти, як SyII, до яких також можна застосувати дану схему, оскільки вони мають типовий для АЯГ I-II типів набір емісійних ліній. Після заміни у 1276 об'єктів червоних зміщень наявними в каталозі [23] було знайдено і виключено з вибірки ще шість об'єктів, уточнені червоні зміщення яких виявились більшими за 1.1 через помилкову ідентифікацію ліній стандартною процедурою SDSS. Таким чином, кількість об'єктів у вибірці АЯГ I типу складає 1429, а середнє червоне зміщення — $\bar{z} = 0.65$.

Рис. 1. Розподіл кількості N об'єктів по значеннях червоного зміщення z для вибірок АЯГ I типу (пунктир), блакитних галактик (суцільна) та випадкових каталогів АЯГ (штрих-пунктир) і галактик (довгі штрихи)



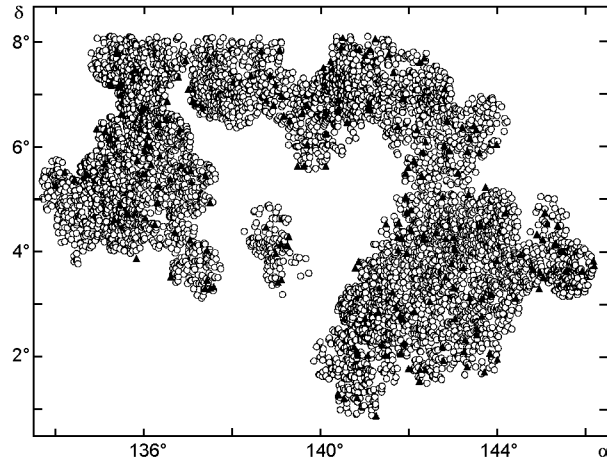


Рис. 2. Покриття небесної сфери вибірками блакитних галактик (кружки) та АЯГ I типу (трикутники) для другого поля огляду WiggleZ DR1

На рис. 1 штриховою і суцільною лініями зображено розподіли кількості об'єктів по значеннях червоного зміщення вибірок АЯГ I типу і блакитних галактик відповідно, а на рис. 2 — розподіл по небесній сфері блакитних галактик (кружки) з другого поля WiggleZ та АЯГ I типу (трикутники) в цій області.

МЕТОДИКА ОБЧИСЛЕННЯ АКФ і ККФ

Вибір оцінок кореляційних функцій. Для обчислення АКФ позагалактичних об'єктів на сьогодні використовується чотири стандартних оцінки: Пібблза і Хойзера [41], Девіса і Пібблза [16], Гамільтона [22] та Ленді і Шалая [31]. Модифікації останніх трьох застосовуються для обчислення ККФ. Найбільш оптимальною з точки зору врахування похибок, а тому найбільш популярною для обчислення АКФ є оцінка Ленді і Шалая, яку ми застосували для обчислення АКФ блакитних галактик:

$$L_{gg}^{LS}(x) = \frac{N_{R,g}(N_{R,g} - 1)}{N_{D,g}(N_{D,g} - 1)} \frac{D_g D_g(x)}{R_g R_g(x)} - 2 \frac{(N_{R,g} - 1)}{N_{D,g}} \frac{D_g R_g(x)}{R_g R_g(x)} + 1,$$

де $DD(x)$, $RR(x)$ — кількість пар об'єктів з відстанню між компонентами в інтервалі $[x, x + \Delta x]$ у вихідному (D) та випадковому (R) каталогах, DR — кількість перехресних пар, N_D та N_R — кількість об'єктів у вхідному та випадковому каталогах відповідно. Індекс «g» відповідає галактикам, для випадкового каталогу це означає, що він побудований на основі вихідного каталогу галактик, тобто займає той самий об'єм та має такий самий розподіл по червоному зміщенню.

У випадку ККФ йдеться про два каталоги об'єктів, кожен з яких має свої особливості, тому найкращою оцінкою ККФ має бути така,

що є симетричною відносно перестановки індексів, тобто однаково враховувати особливості обох каталогів. З іншого боку, побудова випадкових каталогів у випадку невеликих вибірок, наприклад груп і скупчень або рентгенівських джерел з погано відомою функцією селекції, досить складна. Тому, дуже часто [9, 11, 29, 30, 33, 36, 39, 49, 50, 53] використовується модифікована для ККФ оцінка Девіса і Пібблза:

$${}_{Ag}^{DP}(x) = \frac{N_{R,g}}{N_{D,g}} \frac{D_A D_g(x)}{D_A R_g(x)} \quad 1, \quad (2)$$

де індекс «А» відповідає вибірці з меншою кількістю об'єктів, наприклад АЯГ І типу в даній роботі. При цьому необхідний лише один випадковий каталог, що відповідає більшій вибірці (блакитні галактики в даній роботі). Звичайно, така оцінка сама по собі є джерелом додаткових похибок, оскільки через залучення лише одного випадкового каталогу статистичні флуктуації та крайові ефекти, властиві другій вибірці, не беруться до уваги (див. обговорення в роботі [4]). Тому в деяких роботах все-таки використовуються більш оптимальні оцінки, які є симетричними відносно перестановки індексів (в даному випадку «g» та «А») — модифікована для ККФ оцінка Ленді і Шалая [4, 6, 8, 10]:

$${}_{Ag}^{LS}(x) = \frac{N_{R,g} N_{R,A}}{N_{D,g} N_{D,A}} \frac{D_A D_g(x)}{R_A R_g(x)} \frac{N_{R,A}}{N_{D,A}} \frac{D_A R_g(x)}{R_A R_g(x)} \\ \frac{N_{R,g}}{N_{D,g}} \frac{D_g R_A(x)}{R_g R_g(x)} \quad 1 \quad (3)$$

та модифікована для ККФ оцінка Гамільтона [4]:

$${}_{Ag}^{Ham}(x) = \frac{D_A D_g(x) R_A R_g(x)}{D_A R_g(x) D_g R_A(x)} \quad 1. \quad (4)$$

Надалі користуємось загальноприйнятими позначеннями для відстаней: s , r — проекції відстані на промінь зору та на площину, перпендикулярну до нього, відстань в просторі червоних зміщень $s^2 = s_r^2 + s_\perp^2$, а у реальному просторі — $r^2 = r_r^2 + r_\perp^2$. При цьому припускаємо, що негабблівські рухи, які призводять до викривлення КФ у просторі червоних зміщень, основний внесок роблять у складову вимірної відстані, а внеском у r можна знехтувати, тобто $r = r_r$. Всі відстані обчислено за формулами з роботи [27] у рамках просторово-плоскої Λ CDM-моделі з $h = 0.673$, $\Omega_M = 0.315$ [<http://arxiv.org/abs/1303.5076>].

Побудова випадкових каталогів. Випадковий каталог має займати ту саму область на небесній сфері і мати такий самий розподіл по значеннях червоного зміщення, що і вихідний каталог. З рис. 2 можна бачити, що поверхнева концентрація АЯГ І типу дуже мала, а блакитні

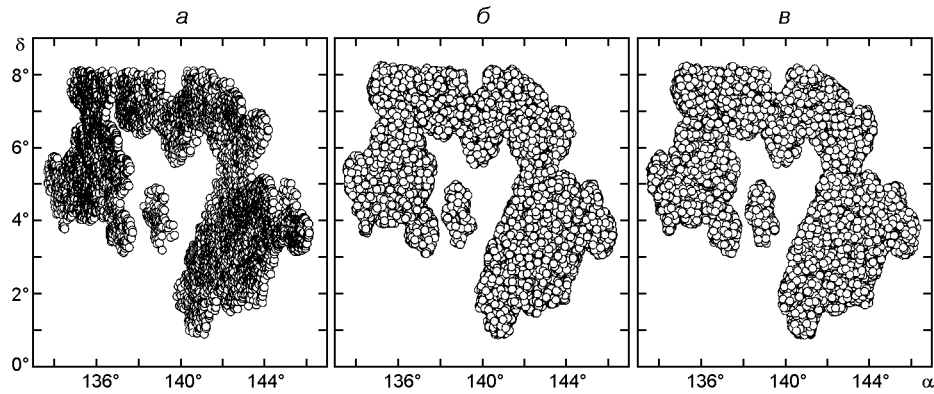


Рис. 3. Покриття небесної сфери об'єктами у межах другого поля WigglyZ: *a* — вихідною вибіркою блакитних галактик, *б* — випадковим каталогом галактик, *в* — випадковим каталогом АЯГ I типу

галактики достатньо однорідно і щільно заповнюють деякі області. Тому при побудові обох випадкових каталогів (для галактик і АЯГ) за орієнтир вибиралась область покриття небесної сфери каталогом блакитних галактик. Практично обидва випадкові каталоги будувались таким чином: вся небесна сфера заповнювалась об'єктами з випадковими координатами, з яких відбирались лише ті, відстань від яких до найближчого об'єкта з вихідної вибірки блакитних галактик становить не більше деякої критичної. За критичну відстань після декількох тестів було обрано 0.2° , що дозволило зберегти область покриття візуально ідентичною площі покриття вихідного каталогу галактик, при цьому не заповнюючи прогалини, але і не виходячи суттєво за межі області. Слід зазначити, що зазвичай вихідні каталоги об'єктів неоднорідні (здебільшого через різні умови спостережень різних частин огляду), але достатньо невеликі площі кожного з семи полів огляду WigglyZ і мала поверхнева концентрація АЯГ I типу дозволяють знехтувати варіаціями концентрації у межах кожного поля. На рис. 3 для порівняння наведено області покриття небесної сфери другим полем вихідного каталогу, випадкового каталогу галактик і випадкового каталогу квазарів. Червоні зміщення для випадкових каталогів генерувались випадковим чином із відповідними кожному вихідному каталогу розподілами. Розподіли об'єктів по значеннях червоного зміщення у випадкових каталогах зображені на рис. 1.

Похибки кореляційних функцій. Для обчислення похибок кореляційної функції було застосовано і порівняно дві різні оцінки. Перша з них, за прикладом робіт [15, 25, 44] — пуассонівська:

$$Poi \frac{1}{\sqrt{DD(x)}},$$

однак дана оцінка добре описує похибки тільки для обмеженого діапазону відліків (в нашому випадку — кількості пар), і тому потребує модифікації для конкретної задачі. Як було зазначено в роботах [13, 14,

Таблиця 1. Параметри вихідних та випадкових підвбірок та повних вибірок, використаних для обчислення похибок методом field-to-field: координати полів, кількість об'єктів та середнє червоне зміщення

Поле	, град	, град	Вихідна підвбірка галактик		Вихідна підвбірка АЯГ І		Випадкова підвбірка галактик		Випадкова підвбірка АЯГ І	
			<i>N</i>	$\langle z \rangle$	<i>N</i>	$\langle z \rangle$	<i>N</i>	$\langle z \rangle$	<i>N</i>	$\langle z \rangle$
1	42...53	-9.5...-5.5	5829	0.516	99	0.687	3922	0.578	3990	0.651
2	133...147	0.5...8.5	5731	0.598	209	0.643	8399	0.577	8391	0.648
3	152...173	-2.0...8.5	15507	0.584	343	0.630	17136	0.576	17042	0.646
4	210...232	-4.0...8.0	23633	0.594	519	0.657	24213	0.579	23737	0.643
5	319...333	-1.6...1.6	8144	0.552	94	0.649	5661	0.577	5382	0.647
6	348...360	-1.4...1.5	4198	0.570	100	0.630	4478	0.578	4309	0.649
7	349...360	-12.0...-8.5	3928	0.580	65	0.619	3785	0.576	3717	0.646
Повна вибірка			66970	0.578	1429	0.650	67735	0.577	67770	0.646

25, 47], на масштабах менше $40...50h^{-1}$ Мпк вона дає достатньо точну оцінку похибок, оскільки пари об'єктів є незалежними, тобто квазари з однієї пари зазвичай не є членами інших пар, але на більших масштабах пари квазарів стають більш скорельованими, і тому при перевищенні числа пар над числом об'єктів у вибірці рекомендується використовувати іншу оцінку [14, 47]:

$$N(x) = \frac{1}{\sqrt{N}}(x),$$

де N — повна кількість об'єктів у досліджуваній вибірці. З іншого боку, на менших масштабах, де кількість пар (величини DD та ін.) може бути меншою за 10, формула (8) дає некоректні значення рівнів достовірності для пуассонівського розподілу. Тому, наприклад, в роботі [13] при значеннях кількості пар менше 20 було використано формулу з роботи [20] для оцінки пуассонівських рівнів достовірності 84 % (що відповідає гауссівським похибкам 1). Для уникнення проблеми з неточністю пуассонівських похибок на великих масштабах застосовуються інші види похибок, обчислення яких пов'язано із розбиттям вибірки на частини, як-от jack-knife [38, 44] та field-to-field [36, 44]. Оскільки поле покриття небесної сфери досліджуваними вибірками складається з окремих полів, найоптимальнішою є остання з них:

$${}_{FF}^2(x) = \frac{1}{N} \frac{RR_k}{1 - k} [\tilde{~}(x) - k(x)]^2,$$

де N — кількість підвбірок або «полів», на які розбито вибірку, ${}_{k}(x)$ — значення величини для k -го «поля», $\tilde{~}(x)$ — значення для всієї вибірки.

З рис. 4, на якому представлені значення ККФ, обчислені за різними оцінками (2)—(4), з пуассонівськими похибками і похибками field-to-field, можна бачити, що пуассонівська недооцінює похибки на

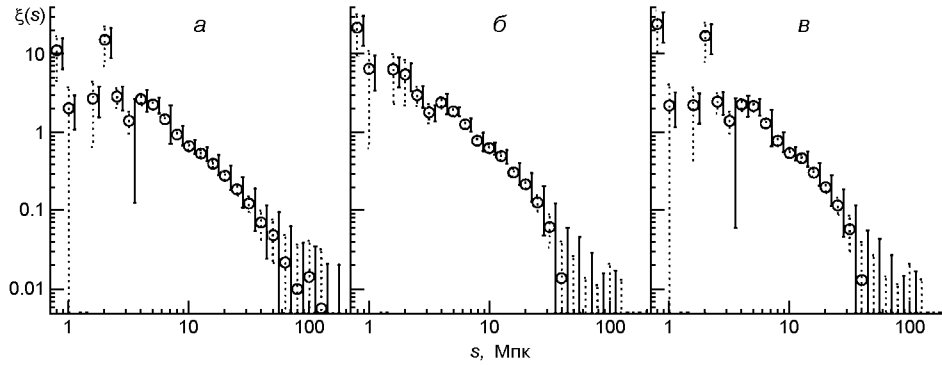


Рис. 4. Значення ККФ у просторі червоних змінь: *a*, *б*, *в* — обчислені з використанням оцінок Девіса — Пібблза [16], Ленді — Шалая [31], Гамільтона [22] відповідно. Пунктир та суцільна лінія — пуассонівські похибки та похибки field-to-field відповідно

всіх масштабах, окрім найменших (при малій кількості пар), де переоцінює її. Тому надалі в роботі при обчисленні параметрів ККФ і АКФ було використано похибки field-to-field. Також варто звернути увагу на те, що на малих масштабах, на яких кількість пар становить одиниці-десятки, оцінки Девіса — Пібблза та Гамільтона збігаються у межах похибок одна з одною, але трохи відрізняються від оцінки Ленді — Шалая. Остання, у свою чергу, дає гладшу криву саме за рахунок врахування перехресних пар, що є другою причиною частішого її використання.

Обчислення параметрів кореляційних функцій. Враховуючи припущення $\xi(r)$, кореляційну функцію (КФ) у реальному просторі можна обчислити за допомогою депроєкції спроектованої $w(\theta)$, вважаючи що 3-вимірна КФ в реальному просторі описується степеневим законом:

$$\xi(r) = \frac{r_0}{r}^{\gamma},$$

де r_0 та γ — відповідно кореляційна довжина та нахил КФ в реальному просторі. Для пошуку параметрів r_0 та γ використано вираз з нашої роботи [27]:

$$\xi(k) = \frac{\sqrt{\Gamma((\gamma-1)/2)}}{L((\gamma/2))} \frac{\Gamma(3-\gamma)}{\Gamma(2-\gamma)} \frac{\Gamma(3-\gamma)}{\Gamma(2-\gamma)}.$$

Тут Γ — гамма-функція, L — максимальна радіальна відстань між компонентами пари об'єктів, яка вибиралась рівною максимальній спроектованій для конкретного випадку, тобто при розгляді КФ на спроектованих масштабах до L до розгляду брались лише пари, радіальна проєкція відстані між компонентами яких теж дорівнює L . Насправді, оскільки спроектована КФ $w(\theta)$ є інтегралом $\xi(r)$ по r у межах $[-L, +L]$, мають враховуватись всі пари з будь-яким значенням r , але пари з $r > L$, що набагато більші за досліджуваний масштаб L , не є фізичними і тому є додатковим джерелом похибок.

У просторі червоних зміщень КФ була апроксимована степеневим законом:

$$(s) = \frac{s_0}{s},$$

де s — нахил КФ у просторі червоних зміщень, s_0 — кореляційна довжина у просторі червоних зміщень. Для обчислення цих параметрів було використано формулу з роботи [27]:

$$(s_k) = \frac{s_0^s}{3} \frac{(s_k - s)^3 - s^3}{s(s_k^2 - s_k s + s^2/3)}.$$

В усіх випадках параметри КФ разом з маргіналізованими похибками знайдені методом максимальної правдоподібності, тобто максимізації величини $\mathcal{L} = \exp(-\chi^2/2)$. Апроксимація була проведена в логарифмічному масштабі з кроком $\lg(x) = 0.1$.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

КФ у реальному просторі. На рис. 5 та 6 зображено отримані спроектовані ККФ, а також АКФ галактик і АЯГ (нормовані для зручності на $\langle s \rangle$) з найкращими апроксимаціями одним та двома степеневими законами відповідно. Параметри апроксимацій наведено у табл. 2. При апроксимації були відкинуті точки з від'ємним значенням кореляційної функції. Слід звернути увагу на великий розкид точок АКФ для АЯГ на масштабах менше 2—3 Мпк, пов'язаний з нестачею в огляді SDSS спектроскопічних даних для пар об'єктів з кутовою відстанню, меншою за $30''$, причиною чого є технічні обмеження (див. [27]).

У більшості випадків [42, 45], коли мова йде про вибірки квазарів у оптичному діапазоні, їхні АКФ апроксимують простішою моделлю — одним степеневим законом, що пов'язано з невеликою статистикою, а отже великими похибками КФ. Але в даному випадку використання ККФ дозволяє отримати АКФ активних ядер галактик з більшою точністю і навіть візуально побачити її злам на масштабах ~ 10 Мпк. Результати апроксимації КФ окремо на інтервалах < 10 Мпк та > 10 Мпк показують суттєво різні нахили. При цьому, якщо для галактик нахили відрізняються на 30 %, то для АЯГ — майже удвічі. Такий злам КФ на деякій характеристичній відстані (з відповідним збільшенням нахилу на відстанях, більших за цю характеристичну) говорить про те, що на цих масштабах починає домінувати внесок у КФ від пар об'єктів, члени яких належать різним гало ТМ. Отримана різниця між величиною зламу для галактик і АЯГ має свідчити про різницю розташування цих об'єктів в елементах коміркової структури Всесвіту. Так, блакитні галактики є у достатній кількості як у скупченнях (які мають відповідати найбільшим гало ТМ), так і у філаментах, а отже, ймовірність знайти пару для галактики хоча і зменшується при

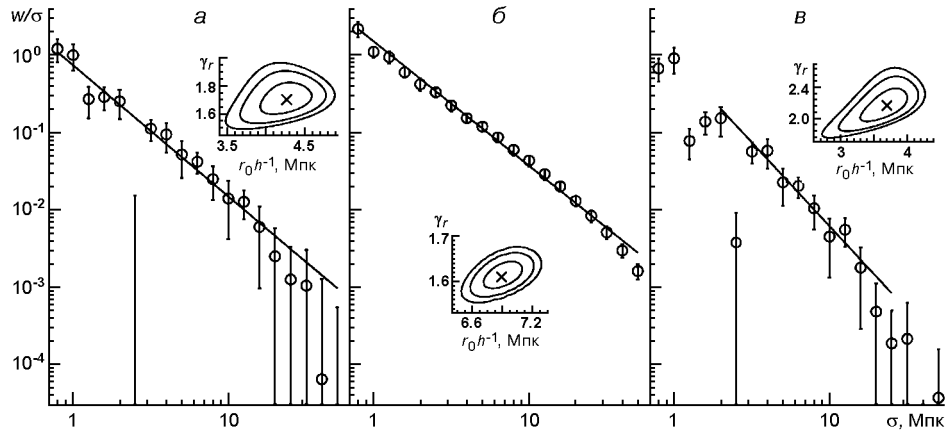


Рис. 5. Спроектовані ККФ і АКФ галактик та АЯГ І типу (а — АЯГ — галактики, б — галактики — галактики, в — АЯГ — АЯГ) з найкращими апроксимаціями одним степеневим законом, а також відповідні рівні 1, 2, 3 функції правдоподібності для них

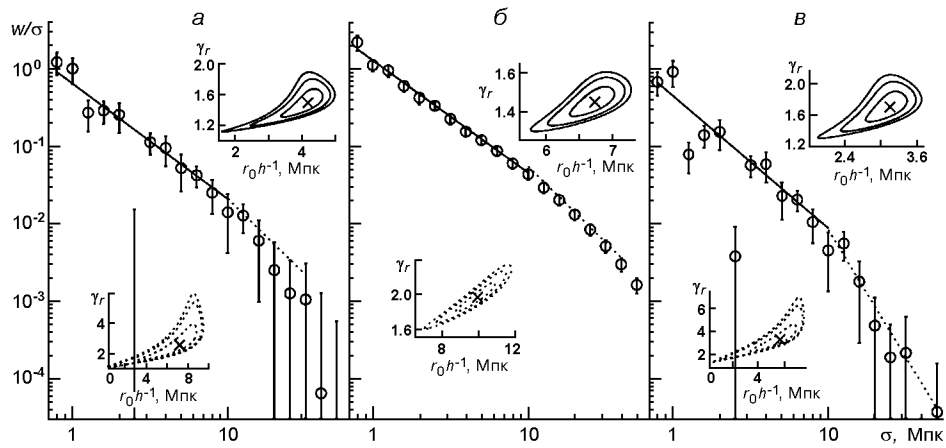


Рис. 6. Те ж для апроксимацій сумою двох степеневих законів (суцільна і пунктирна прямі). Для апроксимацій, показаних пунктиром, відповідні контури також зображені пунктиром

Таблиця 2. Параметри ККФ (АЯГ — галактики) та АКФ (галактики — галактики і АЯГ — АЯГ) у реальному просторі: нахил γ_r та нормована на сталу Габбла кореляційна довжина ($r_0 h^{-1}$) для різних інтервалів апроксимації

КФ	Один степеневий закон			Два степеневих закони					
	σ , Мпк	γ_r	$r_0 h^{-1}$, Мпк	σ , Мпк	γ_r	$r_0 h^{-1}$, Мпк	σ , Мпк	γ_r	$r_0 h^{-1}$, Мпк
АЯГ — гал.	0.8...63	1.70 _{0.12} 0.09	4.27 _{0.30} 0.31	0...10	1.49 _{0.15} 0.09	4.18 _{0.37} 0.36	10...40	2.57 _{0.54} 0.31	7.18 _{0.80} 0.97
	2...32	1.77 _{0.18} 0.12	4.95 _{0.40} 0.44						
Гал. — гал.	0.8...63	1.61 _{0.02} 0.02	6.89 _{0.16} 0.16	0...12	1.45 _{0.06} 0.04	6.74 _{0.23} 0.23	12...63	1.97 _{0.06} 0.05	9.93 _{0.36} 0.37
	2...32	1.50 _{0.03} 0.03	6.88 _{0.22} 0.24						
АЯГ — АЯГ	2...32	2.17 _{0.19} 0.14	3.70 _{0.26} 0.28	0...10	1.71 _{0.18} 0.12	3.15 _{0.24} 0.25	10...63	3.30 _{0.58} 0.33	5.67 _{0.59} 0.78

переході на масштаби, більші за розміри гало, але не суттєво. З іншого боку, різке зменшення величини АКФ для АЯГ на цих масштабах має свідчити про те, що більшість досліджуваних АЯГ перебуває у скупченнях, а у філаментах їх дуже мало. Такий висновок узгоджується із відомою фізичною картиною еволюції галактик і АЯГ: з одного боку, блакитні галактики з огляду WiggleZ — це галактики із активним зореутворенням, тобто відносно молоді галактики, яких багато у філаментах; з іншого ж боку — для утворення АЯГ в епоху, яка відповідає середньому червоному зміщенню досліджуваної вибірки $z = 0.65$, у філаментах вже недостатньо матеріалу (як це було у більш ранню епоху при $z \sim 2$), а отже, АЯГ формуються здебільшого у скупченнях. При цьому їхня кількість (як видно з розмірів досліджуваної вибірки) і світність суттєво менші.

Отриманий результат узгоджується з результатами роботи [15], де на основі апроксимації АКФ вибірки квазарів з каталогу 2QZ в реальному просторі було отримано значення нахилу $\gamma_r = 1.45 \pm 0.27$ та $2.30^{+0.12}_{-0.03}$ на відстанях, менших та більших за $10h^{-1}$ Мпк відповідно. Слід зауважити, що середнє червоне зміщення використаної у [15] вибірки $\bar{z} = 1.4$, тобто йдеться про більш ранню епоху, а отже, зміна нахилу АКФ і має бути гладшою, аніж для досліджуваної нами вибірки, в контексті вище описаної фізичної картини. Подібний злам спроектованої кутової АКФ квазарів на масштабах порядку 30 було отримано в роботі [38] для вибірки фотометрично класифікованих квазарів з першого видання каталогу SDSS NBCKDE, такий кутовий масштаб відповідає приблизно 50 Мпк для середнього червоного зміщення вибірки 1.4, а також у нашій роботі [26] для спектроскопічних каталогів квазарів SDSS Quasar Catalogue III та 2QZ.

Викривлення КФ у просторі червоних зміщень. На рис. 7 та 8 зображено отримані ККФ, а також АКФ галактик і АЯГ у просторі червоних зміщень з найкращими апроксимаціями одним та двома степеневими законами відповідно. Параметри апроксимацій наведено у табл. 3. З отриманих результатів можна бачити наявність зламу КФ на масштабах порядку $10h^{-1}$ Мпк, а також те, що нахили і кореляційні довжини відрізняються від відповідних величин у реальному просторі. Так, наприклад, КФ є гладшою на всіх масштабах у просторі червоних зміщень. Таке явище носить назву викривлення КФ у просторі червоних зміщень і пов'язане з негаблівськими рухами об'єктів: хаотичними рухами галактик в середині віріалізованих скупчень та скорельованими потоками галактик до центрів скупчень матерії, перші з яких призводять до витягнення двовимірної (в площині θ — z) КФ вздовж променя зору на масштабах скупчень (ефект «пальця Бога»), а другі — до сплюснення КФ вздовж променя зору на масштабах, де рухи галактик можна описати у межах лінійної теорії збурень.

На основі співвідношення між АКФ АЯГ в реальному просторі та просторі червоних зміщень на масштабах 5—25 Мпк, де воно є приблизно сталим, було отримано значення параметра баеса АЯГ І типу

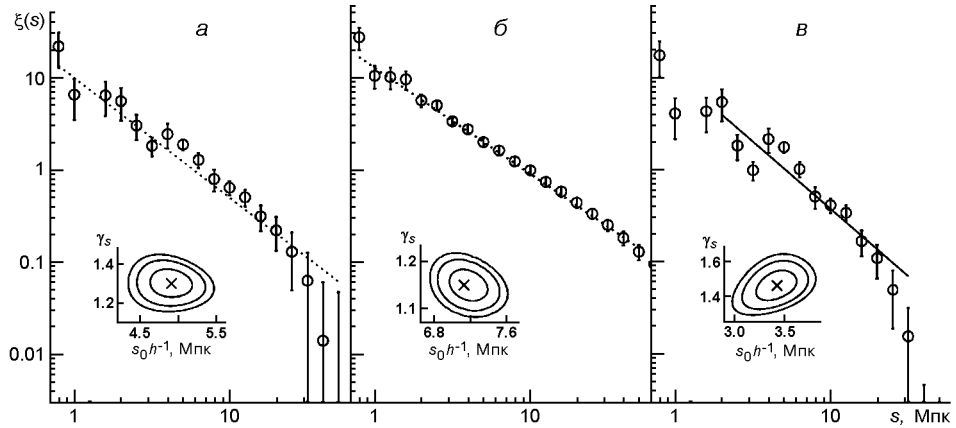


Рис. 7. Значення ККФ і АКФ галактик та АЯГ I типу (*a* — АЯГ — галактики, *б* — галактики — галактики, *в* — АЯГ — АЯГ) з найкращими апроксимаціями одним степеневим законом, а також відповідні рівні 1, 2, 3 функції правдоподібності для них

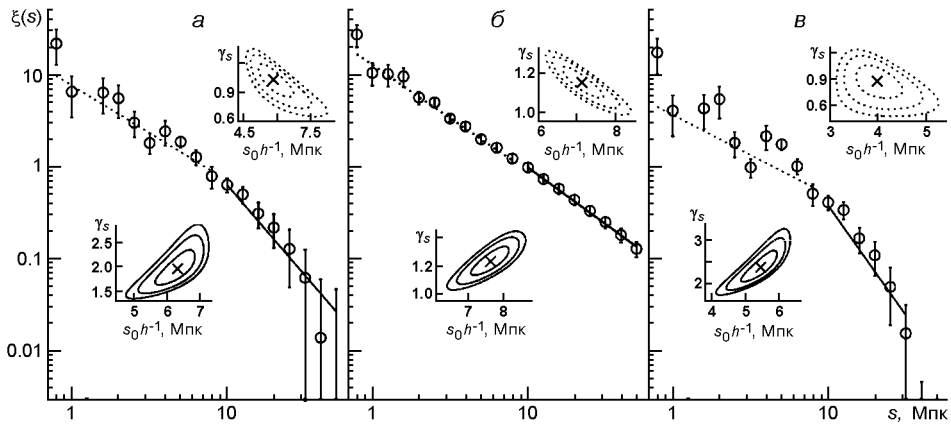


Рис. 8. Те ж для апроксимацій сумою двох степеневих законів (суцільна і пунктирна прямі). Для апроксимацій, показаних пунктиром, відповідні контури також зображені пунктиром

Таблиця 3. Параметри ККФ (АЯГ — галактики) та АКФ (галактики — галактики і АЯГ — АЯГ) у просторі червоних зміщень: нахил γ_s та нормована на сталу Габбла кореляційна довжина ($s_0 h^{-1}$) для різних інтервалів апроксимації

КФ	Один степеневий закон			Два степеневих закони					
	s , Мпк	s	$s_0 h^{-1}$, Мпк	s , Мпк	s	$s_0 h^{-1}$, Мпк	s , Мпк	s	$s_0 h^{-1}$, Мпк
АЯГ — гал.	0.8—63	1.30 _{0.07} 0.06	4.91 _{0.26} 0.27	0—10	1.03 _{0.10} 0.11	5.82 _{0.49} 0.50	10—63	1.96 _{0.25} 0.21	6.32 _{0.38} 0.41
Гал. — гал.	0.8—63	1.15 _{0.03} 0.03	7.18 _{0.20} 0.20	0—10	1.15 _{0.03} 0.04	7.13 _{0.26} 0.26	10—63	1.23 _{0.06} 0.05	7.63 _{0.32} 0.32
АЯГ — АЯГ	2—40	1.46 _{0.08} 0.07	3.43 _{0.18} 0.19	0—10	0.87 _{0.15} 0.18	3.98 _{0.43} 0.42	10—40	2.38 _{0.20} 0.17	5.47 _{0.28} 0.29

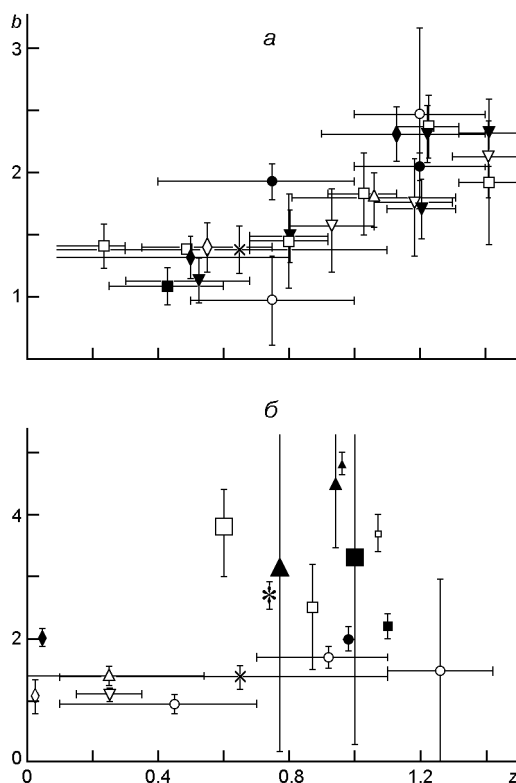


Рис. 9. Залежність параметра b від z : a — для оптичних квазарів з каталогу 2QZ (прямі світлі трикутники — [42], перевернуті темні трикутники — [13], перевернуті світлі трикутники — [43]), першого (світлі кружечки — [38]) та четвертого (темні кружечки — [37]) видання SDSS NBCKDE каталогу фотометрично класифікованих квазарів, четвертого видання спектроскопічного каталогу квазарів SDSS (темні ромбики — [39], темні квадратики — [45], світлі квадратики — [48]) та комбінованої вибірки з каталогів 2SLAQ, 2QZ, AAOmega та п'ятого видання SDSS (світлий кружечок — [36]), похилий хрестик — наші дані для АЯГ І типу; b — для рентгенівських вибірок АЯГ І типу за даними Swift-BAT (світлі ромбики — [5]), АЯГ ІІ типу за даними RASS (перевернуті світлі трикутники — [30]), Swift-BAT (світлі ромбики — [5]), XMM-COSMOS (зірочка — [3]), а також комбіновані (некласифіковані) вибірки з CLASXS та CDF-N (світлі кружечки — [51]), XMM-COSMOS (світлі квадратики — [34], темні кружечки — [21]), XMM (темні трикутники — [18]), Chandra XBootes (світлі трикутники — [24]) та XMM-LSS (темні квадратики — [19]), похилий хрестик — наші дані для АЯГ І типу. Значки більших розмірів відповідають більш жорсткому енергетичному діапазону

b_{AGN} . Для цього використано аналітичне співвідношення Кайзера [28]: $f(z) = \frac{f(z)}{b} [1 - \frac{2}{3} z^2 / 5]$, де параметр $f(z) = f(M, z)/b$ виражається в термінах логарифмічної похідної зростаючої моди збурень $f(M, z)$, яка в рамках просторово-плоского Всесвіту з холодною ТМ та Ω_m -членом має вигляд [7]

$$f(M, z) = \frac{M(1-z)^3}{M(1-z)^3 + 1} \cdot \frac{4}{7}$$

Отримані значення параметрів Ω_m та b дорівнюють відповідно $\Omega_m = 0.58 \pm 0.08$ та $b = 1.38 \pm 0.19$.

Порівняння з попередніми результатами. З рис. 9, а видно, що отримане нами значення баеса для АЯГ І типу добре узгоджується з оцінками баесу квазарів за даними спектроскопічних та фотометричних каталогів, а отже, квазари мають утворюватись у такому ж оточенні, що і всі АЯГ І типу. Цей висновок є логічним у рамках уніфікованої схеми АЯГ. На рис. 9, б наша оцінка баеса порівнюється із значеннями b для рентгенівських вибірок АЯГ, як класифікованих за оптичними спектрами, так і некласифікованих. Слід зазначити великі похибки цих величин, сильну залежність кластеризації АЯГ від світності в рентгенівському діапазоні (що видно із робіт [18, 19, 34]) та складності класифікації рентгенівських АЯГ без ототожнення з оптичними даними. Тому, хоч отриманий результат для оптичних АЯГ І типу і узгоджується з даними для рентгенівських АЯГ всіх типів, для детальнішого аналізу необхідні більші рентгенівські вибірки АЯГ різних типів.

ВИСНОВКИ

Аналіз ККФ та АКФ блакитних галактик та АЯГ І типу на основі вибірок з оглядів WiggleZ та SDSS DR7 показав наявність крутішого зламу АКФ в реальному просторі для АЯГ, ніж для блакитних галактик, що узгоджується із загальноприйнятою фізичною картиною еволюції галактик і АЯГ, де у близьку до нашого часу епоху ($z \sim 0.6$) основним населенням філаментів є галактики із зореутворенням, а АЯГ І формуються здебільшого тільки у скупченнях. Отримане значення параметра баеса для АЯГ І типу добре узгоджується з іншими оцінками для одного з підкласів АЯГ І типу — квазарів, а також з результатами для рентгенівських вибірок АЯГ різних типів, але для детальнішого аналізу останніх потрібні більші рентгенівські вибірки АЯГ різної світності і їхнє ототожнення з оптичними спектроскопічними даними.

Робота була виконана в рамках наукового проекту «Розподіл матерії на близьких і космологічних масштабах Всесвіту та створення інтерактивних інструментів його візуалізації» Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2012—2016 рр. та частково підтримана грантом SCOPE IZ7370-152581 Швейцарського національного наукового фонду.

1. Abazajian K. N., Adelman-McCarthy J. K., Agüeros M. A., et al. The seventh data release of the sloan digital sky survey // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2009.— **182**.— P. 543—558.
2. Adelberger K. L., Steidel C. C. Constraints from Galaxy-AGN clustering on the correlation between galaxy and black hole mass at redshift $2 < z < 3$ // *Astrophys. J. Lett.*—2005.—**627**.—P. L1—L4.
3. Allevato V., Finoguenov A., Cappelluti N., et al. The XMM-Newton Wide Field Survey in the COSMOS field: redshift evolution of AGN bias and subdominant role of merg-

- ers in triggering moderate-luminosity AGNs at redshifts up to 2.2 // *Astrophys. J.*—2011.—**736**.—P. 99.
4. *Blake C., Pope A., Scott D., Mobasher B.* On the cross-correlation of sub-mm sources and optically selected galaxies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2006.—**368**.—P. 732—740.
 5. *Cappelluti N., Ajello M., Burlon D., et al.* Active Galactic Nuclei clustering in the local universe: an unbiased picture from Swift-BAT // *Astrophys. J. Lett.*—2010.—**716**.—P. L209—L213.
 6. *Cappelluti N., Böhringer H., Schuecker P., et al.* The soft X-ray cluster-AGN spatial cross-correlation function in the ROSAT-NEP survey // *Astron. and Astrophys.*—2007.—**465**.—P. 35—40.
 7. *Carroll S. M., Press W. H., Turner E. L.* The cosmological constant // *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.*—1992.—**30**.—P. 499—542.
 8. *Chen J.* The galaxy cross-correlation function as a probe of the spatial distribution of galactic satellites // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**494**.—P. 867—877.
 9. *Coil A. L., Georgakakis A., Newman J. A., et al.* AEGIS: the clustering of X-Ray Active Galactic Nucleus relative to galaxies at $z \sim 1$ // *Astrophys. J.*—2009.—**701**.—P. 1484—1499.
 10. *Coil A. L., Gerke B. F., Newman J. A., et al.* The DEEP2 Galaxy Redshift Survey: clustering of groups and group galaxies at $z \sim 1$ // *Astrophys. J.*—2006.—**638**.—P. 668—685.
 11. *Coil A. L., Hennawi J. F., Newman J. A., et al.* The DEEP2 Galaxy Redshift Survey: clustering of quasars and galaxies at $z = 1$ // *Astrophys. J.*—2007.—**654**.—P. 115—124.
 12. *Coil A. L., Newman J. A., Croton D., et al.* The DEEP2 Galaxy Redshift Survey: color and luminosity dependence of galaxy clustering at $z \sim 1$ // *Astrophys. J.*—2008.—**672**.—P. 153—176.
 13. *Croom S. M., Boyle B. J., Shanks T., et al.* The 2dF QSO Redshift Survey. XIV. Structure and evolution from the two-point correlation function // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2005.—**356**.—P. 415—438.
 14. *Croom S. M., Shanks T.* QSO clustering. III. Clustering in the Large Bright Quasar Survey and evolution of the QSO correlation function // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1996.—**281**.—P. 893—906.
 15. *da Ângela J., Outram P. J., Shanks T., et al.* The 2dF QSO Redshift Survey. XV. Correlation analysis of redshift-space distortions // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2005.—**360**.—P. 1040—1054.
 16. *Davis M., Peebles P. J. E.* A survey of galaxy redshifts. V. The two-point position and velocity correlations // *Astrophys. J.*—1983.—**267**.—P. 465—482.
 17. *Drinkwater M. J., Jurek R. J., Blake C., et al.* The WiggleZ Dark Energy Survey: survey design and first data release // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2010.—**401**.—P. 1429—1452.
 18. *Ebrero J., Mateos S., Stewart G. C., et al.* High-precision multi-band measurements of the angular clustering of X-ray sources // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**500**.—P. 749—762.
 19. *Elyiv A., Clerc N., Plionis M., et al.* Angular correlation functions of X-ray point-like sources in the full exposure XMM-LSS field // *Astron. and Astrophys.*—2012.—**537**.—P. A131.
 20. *Gehrels N.* Confidence limits for small numbers of events in astrophysical data // *Astrophys. J.*—1986.—**303**.—P. 336—346.
 21. *Gilli R., Zamorani G., Miyaji T., et al.* The spatial clustering of X-ray selected AGN in

- the XMM-COSMOS field // *Astron. and Astrophys.*—2009.—**494**.—P. 33—48.
22. *Hamilton A. J. S.* Toward better ways to measure the galaxy correlation function // *Astrophys. J.*—1993.—**417**.—P. 19.
23. *Hewett P. C., Wild V.* Improved redshifts for SDSS quasar spectra // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2010.—**405**.—P. 2302—2316.
24. *Hickox R. C., Jones C., Forman W. R., et al.* Host galaxies, clustering, Eddington ratios, and evolution of radio, X-Ray, and infrared-selected AGNs // *Astrophys. J.*—2009.—**696**.—P. 891—919.
25. *Hoyle F., Outram P. J., Shanks T., et al.* The 2dF QSO Redshift Survey. VII. Constraining cosmology from redshift-space distortions via $(\delta, \delta_{\parallel})$ // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2002.—**332**.—P. 311—324.
26. *Ivashchenko G.* Two-point angular correlation function of quasar distribution for SDSS DR3 and 2QZ catalogues // *J. Phys. Studies.*—2007.—**11**.—P. 350—352.
27. *Ivashchenko G., Zhdanov V. I., Tugay A. V.* Correlation function of quasars in real and redshift space from the Sloan Digital Sky Survey Data Release 7 // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2010.—**409**.—P. 1691—1704.
28. *Kaiser N.* Clustering in real space and in redshift space // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1987.—**227**.—P. 1—21.
29. *Knobel C., Lilly S. J., Carollo C. M., et al.* A group-galaxy cross-correlation function analysis in zCOSMOS // *Astrophys. J.*—2012.—**755**.—P. 48.
30. *Krumpe M., Miyaji T., Coil A. L.* The spatial clustering of ROSAT All-Sky Survey AGNs. I. The cross-correlation function with SDSS Luminous Red Galaxies // *Astrophys. J.*—2010.—**713**.—P. 558—572.
31. *Landy S. D., Szalay A. S.* Bias and variance of angular correlation functions // *Astrophys. J.*—1993.—**412**.—P. 64—71.
32. *Martin D. C., Fanston J., Schiminovich D., et al.* The Galaxy Evolution Explorer: a space ultraviolet survey mission // *Astrophys. J. Lett.*—2005.—**619**.—P. L1—L6.
33. *Miyaji T., Krumpe M., Coil A. L., Aceves H.* The spatial clustering of ROSAT All-sky Survey AGNs. II. Halo occupation distribution modeling of the cross-correlation function // *Astrophys. J.*—2011.—**726**.—P. 83.
34. *Miyaji T., Zamorani G., Cappelluti N., et al.* The XMM-Newton Wide-Field Survey in the COSMOS field. V. Angular clustering of the X-Ray point sources // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—2007.—**172**.—P. 396—405.
35. *Mo H. J., Peacock J. A., Xia X. Y.* The cross-correlation of IRAS galaxies with Abell clusters and radio galaxies // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1993.—**260**.—P. 121—131.
36. *Mountrichas G., Sawangwit U., Shanks T., et al.* QSO-LRG two-point cross-correlation function and redshift-space distortions // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2009.—**394**.—P. 2050—2064.
37. *Myers A. D., Brunner R. J., Nichol R. C., et al.* Clustering analyses of 300,000 photometrically classified quasars. I. Luminosity and redshift evolution in quasar bias // *Astrophys. J.*—2007.—**658**.—P. 85—98.
38. *Myers A. D., Brunner R. J., Richards G. T., et al.* First measurement of the clustering evolution of photometrically classified quasars // *Astrophys. J.*—2006.—**638**.—P. 622—634.
39. *Padmanabhan N., White M., Norberg P., Porciani C.* The real-space clustering of luminous red galaxies around $z < 0.6$ quasars in the Sloan Digital Sky Survey // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2009.—**397**.—P. 1862—1875.
40. *Peebles P. J. E.* The large-scale structure of the universe. — Princeton: Princeton Univ. Press, 1980.—435 p.

41. *Peebles P. J. E., Hauser M. G.* Statistical analysis of catalogs of extragalactic objects. III. The Shane-Wirtanen and Zwicky catalogs // *Astrophys. J. Suppl. Ser.*—1974.—**28**.—P. 19.
42. *Porciani C., Magliocchetti M., Norberg P.* Cosmic evolution of quasar clustering: implications for the host haloes // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2004.—**355**.—P. 1010—1030.
43. *Porciani C., Norberg P.* Luminosity- and redshift-dependent quasar clustering // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2006.—**371**.—P. 1824—1834.
44. *Ross N. P., da Ângela J., Shanks T., et al.* The 2dF-SDSS LRG and QSO Survey: the LRG 2-point correlation function and redshift-space distortions // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2007.—**381**.—P. 573—588.
45. *Ross N. P., Shen Y., Strauss M. A., et al.* Clustering of low-redshift ($z \approx 2.2$) quasars from the Sloan Digital Sky Survey // *Astrophys. J.*—2009.—**697**.—P. 1634—1655.
46. *Schneider D. P., Richards G. T., Hall P. B., et al.* The Sloan Digital Sky Survey Quasar Catalog. V. Seventh Data Release // *Astron. J.*—2010.—**139**.—P. 2360.
47. *Shanks T., Boyle B. J.* QSO clustering — part one — optical surveys in the redshift range $0.3 < z < 2.2$ // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—1994.—**271**.—P. 753.
48. *Shen Y., Strauss M. A., Ross N. P., et al.* Quasar clustering from SDSS DR5: dependences on physical properties // *Astrophys. J.*—2009.—**697**.—P. 1656—1673.
49. *Wang Y., Yang X., Mo H. J., van den Bosch F. C.* The cross-correlation between galaxies of different luminosities and colors // *Astrophys. J.*—2007.—**664**.—P. 608—632.
50. *Yang X., Mo H. J., van den Bosch F. C., et al.* The cross-correlation between galaxies and groups: probing the galaxy distribution in and around dark matter haloes // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2005.—**362**.—P. 711—726.
51. *Yang Y., Mushotzky R. F., Barger A. J., Cowie L. L.* Spatial correlation function of the Chandra-selected Active Galactic Nuclei // *Astrophys. J.*—2006.—**645**.—P. 68—82.
52. *Zehavi I., Zheng Z., Weinberg D. H., et al.* The luminosity and color dependence of the galaxy correlation function // *Astrophys. J.*—2005.—**630**.—P. 1—27.
53. *Zu Y., Weinberg D. H.* The redshift-space cluster-galaxy cross-correlation function. I. Modelling galaxy infall on to Millennium simulation clusters and SDSS groups // *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*—2013.—**431**.—P. 3319—3337.

Стаття надійшла до редакції 07.10.13