

ДВОТОЧКОВА КУТОВА КОРЕЛЯЦІЙНА ФУНКЦІЯ РОЗПОДІЛУ КВАЗАРІВ ДЛЯ КАТАЛОГІВ SDSS DR3 ТА 2QZ

Г. Іващенко

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Астрономічна обсерваторія,
вул. Обсерваторна, 3, Київ, 04053, Україна*

(Отримано 27 листопада 2006 р.; в остаточному вигляді — 10 липня 2007 р.)

Досліджено та порівняно кутову ДКФ розподілу пар квазарів для каталогів SDSS DR3 Quasar Catalogue та 2QZ. Отримані для них значення нахилу кореляційної функції та кореляційної довжини в інтервалі $2' < \theta < 50'$ узгоджуються між собою в межах похибки. За допомогою особливого методу побудови рандом-каталогу показано недостатню кількість пар із кутовою відстанню $1' \dots 2'$ між компонентами в обох оглядах. Знайдено злам кутової кореляційної функції на масштабах порядку 0.5° , що узгоджується з результатом інших авторів.

Ключові слова: квазари, темна матерія, кореляційні функції, великомасштабна структура Всесвіту.

PACS number(s): 98.54.Aj, 95.35.+d, 36.40.Mr, 61.46.Bc

I. ВСТУП

Двоточкова кореляційна функція (ДКФ) розподілу позагалактичних об'єктів є добрим інструментом для дослідження великомасштабної структури Всесвіту. Найповнішу інформацію можна отримати з оцінки тривимірної ДКФ, яка є функцією фізичної (або супутньої) відстані між об'єктами, що включає додаткові параметри, а відтак може бути корисною для перевірки космологічних моделей. З іншого боку, кутова ДКФ найтісніше пов'язана зі спостережуваними даними, і її оцінка не вимагає додаткової інформації про космологічну модель.

Джерелом даних для оцінки ДКФ є огляди позагалактичних об'єктів. При дослідженні розподілу матерії на великих відстанях ($z > 1$) велике значення мають каталоги квазарів як одних із найвіддаленіших і водночас найяскравіших об'єктів у Всесвіті. Світність квазарів в оптичному діапазоні близько 10^{46} ерг/с, що дає змогу спостерігати їх навіть при $z > 5$, але вважається, що основна частина квазарів утворилась при $z \sim 2$, тому доцільно використовувати огляди квазарів для оцінки ДКФ на $1 < z < 2.5$, бо саме в цьому діапазоні вони є найповнішими.

Найбільшими оглядами квазарів на сьогодні є SDSS DR3 [1] та 2QZ [2]. Перший із них складається з 46420 об'єктів, яскравіших за $M_i = -22$. Другий включає 23338 квазарів з $18.25 < b_j < 20.25$. У цій роботі для оцінки та порівняння ДКФ використано такі підвибірки об'єктів: 18665 квазарів із каталогу 2QZ (8266 з Північної смуги та 10399 з Південної) з червоними зміщеннями $0.4 < z < 2.2$ (у цьому діапазоні огляд найповніший, див. [2]) та 22301 квазар із каталогу SDSS DR3 з найбільшої ділянки небесної сфери ($111^\circ < \alpha < 268^\circ$, $19^\circ < \delta < 69^\circ$), яка найкраще покрита оглядом, з таким же діапазом червоних зміщень.

Хоча огляди квазарів мають достатню глибину, вони містять на порядок менше об'єктів, ніж огляди га-

лактик. Це ускладнює оцінку ДКФ. Крім того, кожен огляд має власні ефекти селекції, як-то скінченність його об'єму та неоднорідність, що пов'язані з властивостями приймачів та особливостями умов спостереження. Саме тому важливим етапом при оцінці ДКФ є побудова так званого рандом-каталогу, тобто такого каталогу, яким би мав бути реальний при рівномірному випадковому розподілі об'єктів у Всесвіті за відсутності кластеризації. Перевищення кількості пар близьких об'єктів у реальному каталозі над відповідною кількістю для рандом-каталогу дає оцінку кореляційної функції. Існують різні методи побудови рандом-каталогу. У цій статті використано метод генерації рандом-каталогу, який запропонували автори в роботі [3].

II. ВИЗНАЧЕННЯ ДВОТОЧКОВОЇ КОРЕЛЯЦІЙНОЇ ФУНКЦІЇ

Відповідно до [4], кутова ДКФ $w(\theta)$ однорідного розподілу визначає ймовірність знайти два квазари з положеннями в малих тілесних кутах $d\Omega_1$ та $d\Omega_2$ на одиничній сфері

$$dP = n_0^2 [1 + w(\theta)] d\Omega_1 d\Omega_2, \quad (1)$$

де n_0 — середня густина квазарів на небесній сфері у цій ділянці. Розподіл вважається однорідним, тобто $w(\theta)$ залежить лише від різниці куткових положень θ .

Відповідно перевищення кількості пар dN_p в реальному каталозі над випадковим фоном dN_p^* є

$$d(N_p - N_p^*) = \frac{1}{2} N_t n_0 w(\theta) d\Omega, \quad (2)$$

де $d\Omega = 2\pi\theta d\theta$, а N_t — повна кількість об'єктів у вибірці.

Для визначення ДКФ зручно використовувати оцінку кількості пар із заданого інтервалу розмірів

θ' і диференційних червоних зміщень Δz , нормовану на площу кільця з радіусом θ і товщиною β

$$\frac{dN}{d\Omega} = N(\theta, \varepsilon) = \frac{N(\theta \leq \theta' < \theta + \beta, \varepsilon \leq \Delta z < \varepsilon + \zeta)}{2\pi\beta(\theta + \frac{\beta}{2})}, \quad (3)$$

а також аналогічну величину $n^*(\theta, \varepsilon)$ для рандом-каталогу, де ζ та β визначають інтервали дискретизації за Δz та кутом θ . Підрахувуючи кількість пар із заданою кутовою відстанню θ' між компонентами, достатньо обмежитись парами з $|\Delta z| < \zeta_C$, де ζ_C — деяка кореляційна довжина. Підрахунки пар із різними Δz для реального каталогу та порівняння їх з рандом-каталогом показали, що достатньо обмежитись парами з $\Delta z < 0.1$, оскільки ширші пари лише вносять додаткові похибки.

Із урахуванням (2) для оцінки ДКФ використовуємо співвідношення

$$w(\theta) = \frac{2[n(\theta, 0) - n^*(\theta, 0)]}{n_0 N_t}, \quad (4)$$

при цьому ми вибирали $\varepsilon = 0$, $\zeta = 0.1$, що відповідає фізичній відстані менше 200 Мпк для цих каталогів.

Рандом-каталоги генерували за методом, описаним у праці [3]. У вихідному каталозі значення червоних

зміщень переставляли випадковим чином, а значення прямого сходження і схилення залишалися такими ж. Отже, виключаються реальні фізичні кореляції пар квазарів (оскільки при обчисленнях враховуються лише пари з близькими значеннями червоних зміщень) при одночасному збереженні розподілу по небесній сфері та за z . Згенеровано 100 рандом-каталогів, а величина $n^*(\theta, 0)$ отримана внаслідок усереднення за цими реалізаціями.

III. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

У цій статті досліджено та порівняно кутову ДКФ розподілу тісних пар квазарів для двох найбільших із відомих на сьогодні каталогів квазарів SDSS DR3 Quasar Catalogue та 2QZ. Значення ДКФ, визначені за формулою (4), були апроксимовані загальнопринятною степеневою функцією

$$w(\theta) = [\theta_0/\theta]^\alpha, \quad (5)$$

де θ_0 — кутова кореляційна довжина, α — нахил кореляційної функції. Для галактик значення останньої величини $\alpha \sim 0.7 \dots 0.8$.

інтервал	α (SDSS DR3)	α (2QZ)	θ_0 (SDSS DR3)	θ_0 (2QZ)
1' – 300'	1.14 ± 0.08	1.09 ± 0.09	0.067 ± 0.004	0.017 ± 0.007
1' – 30'	1.09 ± 0.09	0.98 ± 0.17	0.056 ± 0.008	0.010 ± 0.005
50' – 300'	1.75 ± 0.11	—	0.814 ± 0.010	—

Таблиця 1. Значення нахилу α ДКФ та кореляційної довжини θ_0 (у куткових мінутах) для різних інтервалів апроксимації для каталогів SDSS DR3 та 2QZ.

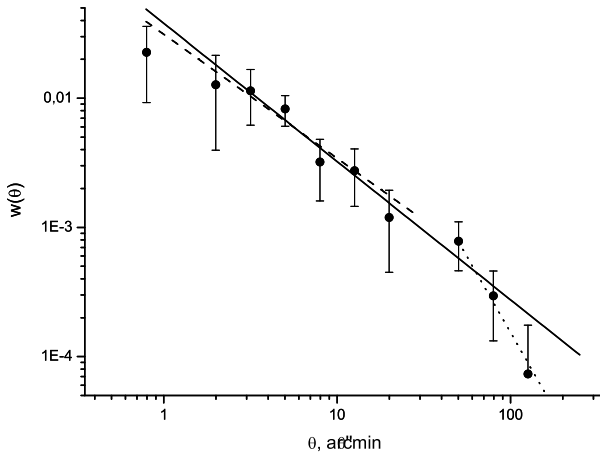


Рис. 1. ДКФ розподілу квазарів із каталогу SDSS DR3. Пунктиром та точками показані результати апроксимації на інтервалах 1...30 та 50...300 куткових мінут. Суцільна лінія — результат апроксимації для всього інтервалу.

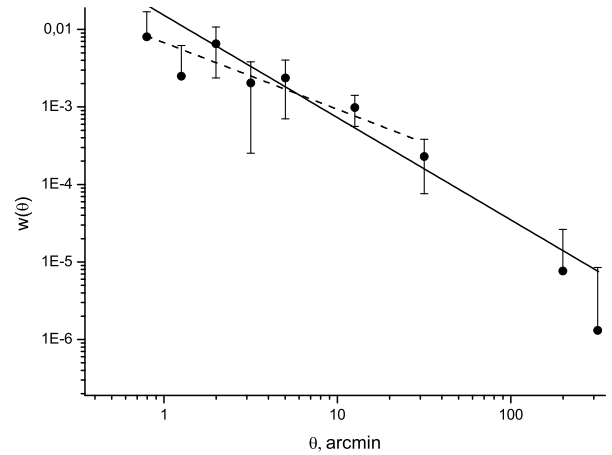


Рис. 2. ДКФ розподілу квазарів із каталогу 2QZ. Пунктиром показаний результат апроксимації на інтервалах 1...30 куткових мінут. Суцільна лінія — результат апроксимації для всього інтервалу.

Варто зазначити, що для врахування неоднорідності каталогів у формулі (4), замість n_0 (середньої густини для всієї вибірки), використано величину $\langle n_0(\theta) \rangle$ — середнє значення густини для окремих ділянок вибірки, у яких знайдено ці пари з кутовою відстанню θ між компонентами. Результати представлені в таблиці 1 та на рис. 1, рис. 2.

На інтервалі від 2 до 50 кутових мінут значення нахилу кореляційної функції для обох каталогів є однаковими в межах похибки. Для інших інтервалів кореляційні функції мають деякі особливості. Той факт, що площа небесної сфери, покрита SDSS DR3, є значно більшою, аніж 2QZ, дає змогу ліпше простежити поведінку ДКФ для першого каталогу на більших інтервалах, аніж для другого. Можливо, саме тому відрізняються значення нахилу ДКФ для двох каталогів, оскільки ширина смуг каталогу 2QZ за схиленням становить близько $3^\circ - 4^\circ$. Слід зазначити, що степенева форма кореляційної функції є справедливою лише на окремо взятих досліджуваних інтервалах, при переході між якими її нахил може суттєво відрізнятись. Загалом ДКФ має складнішу форму.

Для обох каталогів характерною рисою ДКФ є її злам на масштабах близько 0.5° , що, можливо, вказує на розміри скупчень (це відповідає ~ 15 Мпк для $z = 2$) або ж на особливості вибірки каталогів. Такий самий злам ДКФ на приблизно такому ж масштабі знайшли автори праці [5], які досліджували всі фотометрично ідентифіковані квазари з SDSS Early Data Release. Крім того, вони знайшли другий злам ДКФ на масштабах близько $1'$. Тут варто зазначити, що каталог квазарів SDSS DR3, який досліджено в нашій статті, так само, як і 2QZ, є результатом спект-

рометричної ідентифікації об'єктів, що були первинно фотометрично ототоженні як квазари. Спектрометрія дуже близьких об'єктів є складною задачею, тому обидва ці каталоги взагалі не включають вузьких пар із відстанню менше $1'$. Щобільше, завдяки специфічному методу побудови рандом-каталогів, що враховує особливості вихідного, виявлено недостачу пар квазарів з $1' < \theta < 2'$ для каталогу SDSS DR3 порівняно з 2QZ.

Варто звернути увагу на те, що нахил кореляційної функції квазарів у цій роботі, як і в праці [5], є більшим, аніж загальноприйнятий для галактик $\sim 0.7 \dots 0.8$. Це може бути пов'язано, по-перше, з різною природою досліджуваних об'єктів, адже відомо, що нахил ДКФ відрізняється навіть для різних типів галактик (див. [6], [7]), по-друге, з проявами еволюційних ефектів, тому що ДКФ галактик відображає структуру Всесвіту в наш час, а ДКФ досліджених у цій статті квазарів — на $z = 0.4 \dots 2.2$. Але слід пам'ятати, що на таких відстанях ми не бачимо слабких квазарів через обмеження граничного потоку, який здатні фіксувати сучасні телескопи. З цієї ж причини неможливо поки що зробити глибокий докладний огляд “спокійних” галактики, які навіть на таких червоних зміщеннях становлять основну частину об'єктів. З іншого боку, існує гіпотеза залежності кластеризації квазарів від їх яскравості, суть якої полягає в тому, що потужніші квазари мають утворюватись у щільніших скупченнях. Отже, відмінність отриманих параметрів ДКФ квазарів у цій роботі може бути наслідком одночасного впливу селекційних ефектів каталогів і залежності параметрів кластеризації від природи об'єктів.

- [1] D. P. Schneider *et al.*, *Astrophys. J.* **130**, 367 (2005).
 [2] S. M. Croom *et al.*, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **349**, 1397 (2004).
 [3] V. I. Zhdanov, J. Surdej, *Astron. Astrophys.* **372**, 1 (2001).

- [4] P. J. E. Peebles, *The Large Scale Structure of the Universe* (Princeton Univ. Press, 1980).
 [5] A. D. Myers *et al.*, *Astrophys. J.* **638**, 622 (2006).
 [6] T. Budavary *et al.*, *Astrophys. J.* **595**, 59 (2003).
 [7] A. J. Connolly *et al.*, *Astrophys. J.* **579**, 42 (2002).

TWO-POINT ANGULAR CORRELATION FUNCTION OF QUASAR DISTRIBUTION FOR SDSS DR3 AND 2QZ CATALOGUES

G. Ivashchenko

*Taras Shevchenko National University of Kyiv, Astronomical Observatory,
 3, Observatorna St., Kyiv, 04053, Ukraine
 g.ivashchenko@gmail.com*

The results of estimation and comparison of the two-point angular correlation function of quasars for two largest quasar catalogues (SDSS DR3 and 2QZ) are presented. The obtained values for the slope of the correlation function and the correlation length agree within errors for two samples in the range of $2' < \theta < 50'$. Corresponding values for other intervals have some peculiarities caused by catalogues properties. The break in the correlation function over 0.5° was found which agrees with the results of [A. D. Myers, *et al.*, *Astrophys. J.* **638**, 622 (2006)]. The use of a specific method for random-catalogue construction allowed to establish lack of close pairs in both catalogues.