



ISSN 2411–6602 (Online)

ISSN 1607–2855 (Print)

Том 13 • № 2 • 2017 С. 81 – 84

УДК 524.8 : 519.2

## Моделювання Великомасштабної структури Всесвіту за допомогою випадкових гаусівських полів

А.В. Тугай\*, В.В. Войцеховський

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 03127, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 4а

*Великомасштабна структура включає в себе скупчення галактик, з'єднані філаменатами. Войди займають більшість об'єму у Всесвіті. В цій роботі ми змоделювали двовимірний розподіл галактик, використовуючи випадкові розподіли скупчень та ізольованих галактик. Головним припущенням було те, що матерія групується навколо початкових флуктуацій густини з однорідним розподілом. Згідно теорії Зельдовича, низьковимірні анізотропія повинна збільшуватись, що призводить до появи філаментів у двовимірному випадку. Тому ми згенерували сітку філаментів між скупченнями з певними межами відстані. Реальний розподіл галактик був змоделюваний зміною випадкових положень галактик в філаменатах і скупченнях. Ми згенерували галактики в скупченнях за рахунок нелінійних залежностей від навколишніх скупчень і додали рівномірний розподіл ізольованих галактик у войдах. Розподіл нашої моделі добре корелює з наявними спостереженнями Всесвіту на великих масштабах, таких як Слоанівський Цифровий Огляд Неба.*

**Ключові слова:** великомасштабна структура Всесвіту; галактики: скупчення; галактики: утворення.

### 1. ВСТУП

Темою даної роботи було моделювання Великомасштабної структури Всесвіту за допомогою випадкових гаусівських полів. З одного боку, на найбільших масштабах — 1000 Мпк або більше — взагалі відсутня будь-яка структура Всесвіту, в цих масштабах Всесвіт однорідний, безструктурний та ізотропно розширюється. З іншого боку, в масштабах менше 50–100 Мпк існує велика різноманітність структур, це гравітаційно зв'язані збірки галактик, які групуються в скупчення і надскупчення, які розділяються великими порожнинами (войдами). Відповідно до спостережних даних, ці войди займають більшу частину всього об'єму Всесвіту. Організація галактик в бісероподібну, космічну павутину, з'єднану філаменатами, є природним результатом гравітаційної нестійкості в холодній темній матерії, яка грає домінуючу роль в просторовому вигляді Всесвіту майже на всіх масштабах [7]. З аналізу розподілу галактик на середніх відстанях, характерних для скупчень, ми отримуємо інформацію про формування Великомасштабної структури Всесвіту. На цих відстанях розподіл галактик певною мірою відповідає розподілу флуктуацій густини речовини, що мав місце в епоху рекомбінації. Можна зробити два крайніх припущення про початкові збурення густини. Згідно першого, на ранній стадії (радіаційно-домінуючій) Всесвіт має ідеальну, незбурену метрику, зв'язану розподілом густини. Збурення представляють собою неоднорідності розподілу випромінювання. Тому відношення  $\gamma/\beta$  (число фотонів, які приходяться на один баріон) непостійне. Оскільки питома ентропія речовини пропорційна цій величині, то такі збурення називаються ентропійними. Другий тип збурень представляє собою загальний рух фотонів і баріонів. В таких збуреннях ентропія зберігається, і тому вони називаються адіабатичними. Згідно цьому, в адіабатичній теорії раннє утворення зірок, кулястих скупчень або навіть галактик неможливе. Спочатку повинні вирости великомасштабні збурення, і тільки потім можлива їх фрагментація на більш малі об'єкти.

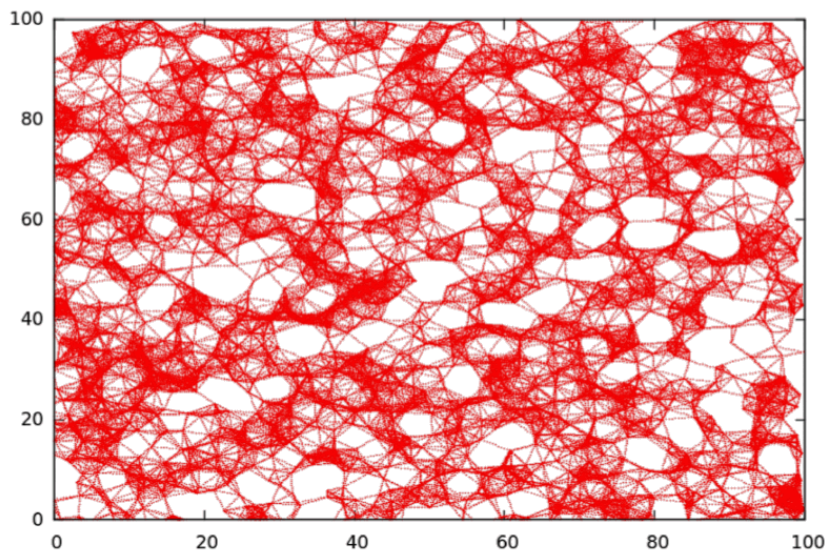
Розглядається декілька різних фаз розвитку збурень:

1. Войди займають більшу частину всього об'єму.
2. Акустичні коливання радіаційно-домінуючої плазми і їх затухання до і під час рекомбінації.
3. Ріст малих збурень в нейтральному газі.
4. Нелінійний ріст збурень, який призводить до утворення стиснених газових шарів — “млинців”.
5. Подальша еволюція “млинців”, їх взаємодія, розпад на галактики і на протоскупчення галактик [3].

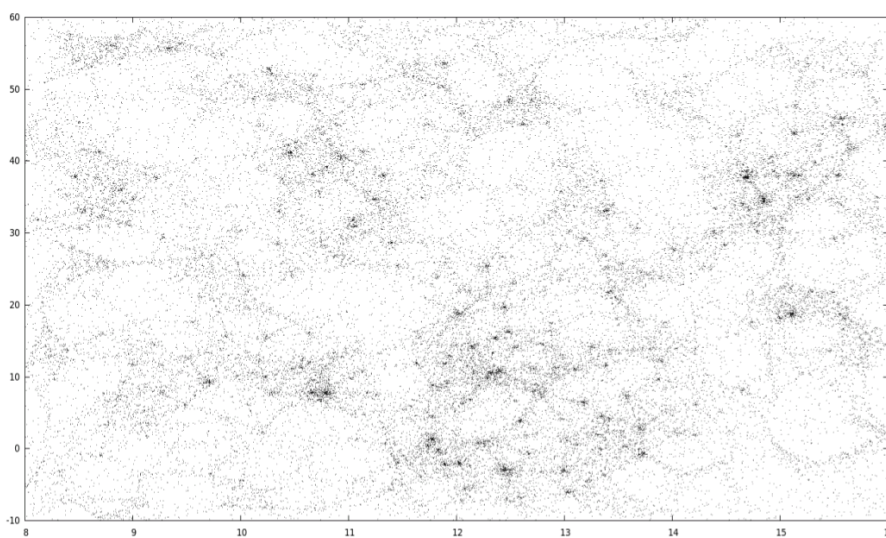
Існує велика різноманітність математичних методів дослідження Великомасштабного розподілу галактик та скупчень галактик, зокрема  $n$ -точкові кореляційні функції.

Якщо знехтувати різницями між динамічними параметрами галактик, то їхній розподіл можна описати як розподіл точкових об'єктів  $r$  за допомогою методу  $n$ -точкових кореляційних функцій [6]. Метод надійшов до астрономії із теорії неідеального газу та був розроблений Ф.Дж.Піблсом та Е.Гротом у

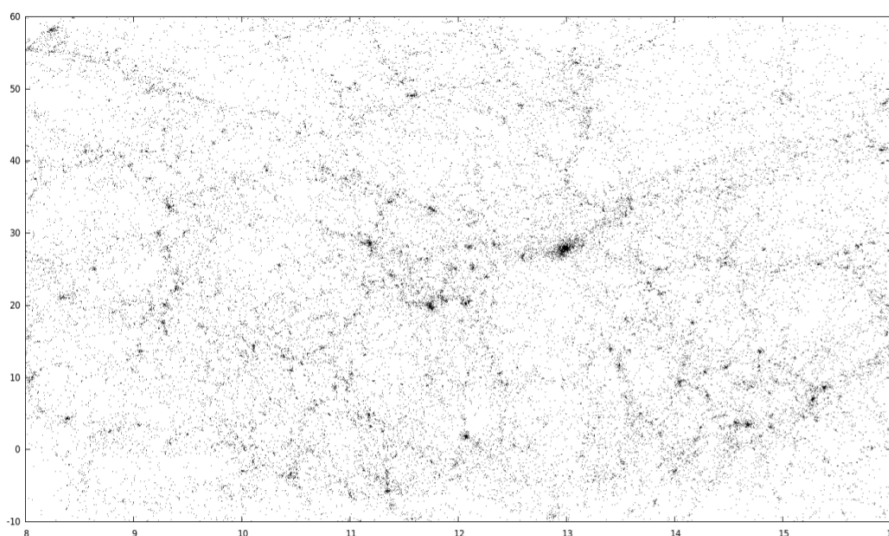
\* Тугай Анатолій Володимирович; ✉ [tugay.anatoliy@gmail.com](mailto:tugay.anatoliy@gmail.com)



**Рис. 1.** Випадковий розподіл сітки точок, з'єднаних прямими філаментами



**Рис. 2.** Випадкова модель розподілу галактик, змодельована за допомогою гаусівських полів



**Рис. 3.** Реальний розподіл галактик на основі вибірки SDSS (Sloan Digital Sky Surey), для порівняння з отриманими результатами

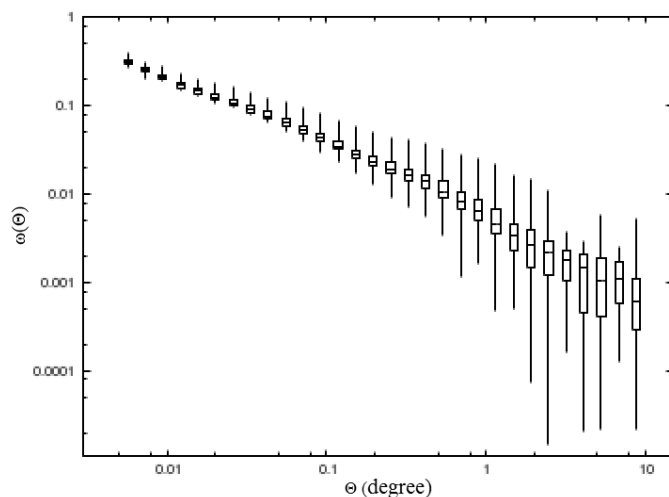


Рис. 4. Двоточкова кутова кореляційна функція для галактик із фрагменту огляду SDSS [1]

1976 році. Кореляційна функція  $\xi(r)$  може бути визначена як перетворення Фур'є-спектра флуктуації щільності

$$\xi(r) = 4\pi \int_{k_{\min}}^{k_{\max}} P(k) \frac{\sin(2\pi kr)}{2\pi kr} k^2 dk, \quad (1)$$

де  $k$  — номер хвилі, який виражений у таких одиницях, що  $k_{\min} = 1$  відповідає довжині сторони  $L$  кубічного об'єму, який був визначений у дослідженні, а  $k_{\max}$  — максимальний номер хвилі для даної вибірки, відстань  $r$  виражена в одиницях довжини  $L$  куба. На практиці двоточкова кореляційна функція визначається у термінах імовірності того, що усереднення загальної вибірки об'єктів із середньою щільністю  $n$ , галактики із будь-якої пари можуть бути незалежно виявлені у середині елементарних об'ємів  $\delta V_1$  та  $\delta V_2$  на відстані  $r$  один від одного (у теорії а ріогі вводитьсь ствердження, що космологічний принцип не порушується):

$$\delta P_2 = n^2 \delta V_1 \delta V_2 [1 + \xi(r)]. \quad (2)$$

Якщо розподіл є пуассонівським, то  $\xi(r) = 0$ . Таким чином,  $\xi(r)$  описує відхилення від пуассонівського (однорідного) розподілу. Якщо галактики скупчуються в певні системи, то  $\xi(r)$  буде позитивною для  $r$ , менших ніж розмір системи, та  $\xi(r)$  буде від'ємною для  $r$ , більших ніж розміри системи. Оскільки каталоги галактик містять відомості про кутові координати галактик, кутова відстань  $\Theta$  між будь-якою парою є відомою. У цьому випадку зручною статистичною мірою є кутова кореляційна функція, яка теж була введена Піблсом із співробітниками у їхніх систематичних дослідженнях каталогів об'єктів [4]. За аналогією із викладеним вище, кутова КФ  $\omega(\Theta)$  дорівнює ( $\Omega$  — елемент тілесного кута)

$$\delta P_2 = N^2 \delta \Omega_1 \delta \Omega_2 [1 + \omega(\Theta)]. \quad (3)$$

Кутову кореляційну функцію можна спостерігати і перетворити у просторову кореляційну функцію за допомогою рівняння Лімберта. Таким чином, галактики корелюють на масштабах у 5 Мпк, і цей результат достатньо впевнений для діапазону відстаней від 10 кпк до 10 Мпк, після якого ця функція має різке спадання. Аналогічно будуються три- та чотириточкові кореляційні функції. Безумовно, повну картину кореляцій між галактиками дало б використання всіх  $n$ -точкових кореляційних функцій, але у даний момент не існує можливості простежити кореляційну функцію високих порядків у спостережних даних. Метод дає хороші результати у третьому порядку та на межі точності у четвертому [2].

## 2. АЛГОРИТМ ГЕНЕРАЦІЇ ВИПАДКОВИХ РОЗПОДІЛІВ

Завдання чисельного  $N$ -вимірного і гідродинамічного космологічного моделювання є досить складним. Важко порівнювати результати моделювання зі спостережними даними через великі систематичні похибки [5]. Метою даної роботи було змодельовати поточний великомасштабний розподіл галактик випадковими гаусівськими полями. Ми вибрали шар товщиною 100 Мпк і заповнили його скупченнями галактик, філаментами та ізольованими галактиками. Галактики в скупченнях і філаментах мають гаусівський розподіл. Побудована нами модель залежить від наступних параметрів:  $n = \frac{z^5}{1000}$  — кількість галактик в скупченнях;  $z$  — кількість філаментів;  $r_1 = \frac{r}{2}$ ,  $r_2 = 5r$  — гранична відстань для прокладання філаментів;  $r$  — середня відстань між філаментами.

На рис. 1 продемонстрований випадковий розподіл точок, координати яких залежать від відстані між точками і з'єднані за допомогою прямих філаментів. Як видно з рисунка, у розподілі випадкових точок

уже проглядається тенденція до скупчення і наявності войдів. На рис. 2 зображена випадкова модель розподілу галактик, змодельована за допомогою гаусівських випадкових полів в залежності від маси філаментів (кількості наявних там галактик) та граничних відстаней між ними з додаванням ізольованих галактик. На рис. 3 представлений спостережний розподіл галактик на основі вибірки SDSS. Порівнюючи його з рис. 2, можна бачити беззаперечну подібність. Подібність розподілів галактик може бути оцінена кількісно, шляхом обчислення двоточкової кореляційної функції. Рис. 4 демонструє обраховану двоточкову кутову кореляційну функцію для галактик із фрагменту огляду SDSS [1]. Відповідні результати будуть отримані в нашій наступній роботі.

### 3. ВИСНОВОК

Було розроблено метод для моделювання розподілу матерії за допомогою гаусівських випадкових полів. Результати змодельованого розподілу є близькими до спостережних розподілів галактик, зокрема Слоанівського цифрового огляду неба. В наступній роботі метод буде покращений за допомогою двоточкової кутової кореляційної функції.

1. Wang Y., Bunner R.J., Dolence J.C. The SDSS Galaxy Angular Two-Point Correlation Function. — arXiv:1303.2432v2.
2. Вавилова І. Великомасштабна структура Всесвіту. Спостереження і методи дослідження. — Київ, 1998.
3. Лонгейр М., Эйнасто Я. Крупномасштабная структура Вселенной. — М., 1981.
4. Пиблс Ф. Дж. Э. Структура Вселенной в больших масштабах. — М.: Мир, 1983.
5. Tugay A.V. Extragalactic filament detection with a layer smoothing method // Advances in Astronomy and Space Physics. — 2014. — Vol. 4. — P.42–45.
6. 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. Not. R. Astron. Soc. — 2010. — Vol. 409. — P.1691–1704.
7. Tugay A.V. Signatures of large-scale structure of Universe in X-rays // Odessa Astronomy Publications. — 2012. — Vol. 25. — P.142–144.

#### Моделирование крупномасштабной структуры Вселенной при помощи случайных гауссовских полей

Тугай А.В., Войцеховский В.В.

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, 03127, г. Киев, пр. Академика Глушкова, 4а

Крупномасштабная структура включает в себя скопления галактик, соединенные филаментами. Войды занимают большую часть объема Вселенной. В этой работе мы смоделировали двумерное распределение галактик, используя случайные распределения скоплений и изолированных галактик. Главным предположением было то, что материя группируется вокруг начальных флуктуаций плотности с однородным распределением. Согласно теории Зельдовича, маломерная анизотропия должна увеличиваться, что приводит к образованию филаментов в двумерном случае. Поэтому мы сгенерировали сетку филаментов между скоплениями с определенными пределами расстояний. Реальное распределение галактик было смоделировано изменением случайных положений галактик в филаментах и скоплениях. Мы сгенерировали галактики в скоплениях за счет нелинейных зависимостей от окружающих скоплений и добавили равномерное распределение изолированных галактик внутри войдов. Распределение нашей модели хорошо коррелирует с имеющимися наблюдениями Вселенной на больших масштабах, таких как Слоановский Цифровой Небесный Обзор.

**Ключевые слова:** крупномасштабная структура Вселенной; галактики: скопления; галактики: образование.

#### Simulation of large-scale structure of Universe with Gaussian random fields

Tugay A.V., Voytsehovskiy V.V.

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Hlushkova Avenue 4a, 03127 Kyiv, Ukraine

Large-scale structure includes galaxy clusters connected by filaments. Voids occupy the rest of cosmic volume. In this work we simulated two-dimensional galaxy distribution using random distributions of clusters and single galaxies. The main assumption was that matter clustered to initial density fluctuation with uniform distribution. In cosmological theory of gravitational instability primordial perturbations are considered as Gaussian. According to Zeldovich theory, low-dimensional anisotropies should increase, that corresponds to appearance of filaments in 2D case. The motivation for 2D consideration of large-scale structure is “finger of God” effect concerned with peculiar velocities of galaxies in clusters. We considered layers of 100 Mpc by radial distance that correspond to one void or supercluster. To simulate cosmic web we generated a net of filaments between clusters with certain length limits. Real galaxy distribution was simulated by changing of random positions of galaxies in filaments and clusters. We generated galaxies in clusters by nonlinear dependencies from surrounding clusters and add uniform distribution of isolated galaxies in voids. The distribution of our model correlate well with the available observations of the Universe at large scales such as Sloan Digital Sky Survey. We selected SDSS galaxies at distances from 100 to 200 Mpc that corresponds to position of Coma supercluster. More distant regions has large deficit of galaxies due to selection effect. Numerical measure for comparison of galaxy distribution is two-point correlation function or power spectrum. Further calculation of correlation function will allow to select optimal parameters of simulation for the best correspondence with real matter distribution.

**Keywords:** large-scale structure of Universe; galaxies: clusters; galaxies: formation.

Надійшла до редакції / Received 2.10.2017

Виправлена авторами / Revised 1.11.2017

Прийнята до друку / Accepted 8.11.2017