



ISSN 2411–6602 (Online)

ISSN 1607–2855 (Print)

Том 14 • № 2 • 2018 С. 87 – 92

<https://doi.org/10.18372/2411-6602.14.13>

Оглядова стаття

УДК 524.8:519.2

Філаменти темної матерії

А.В. Тугай

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

Дана робота є оглядом проблем виявлення міжгалактичних філаментів і визначення орієнтації галактик. Філаменти як елемент великомасштабної структури Всесвіту розглядаються з середини минулого століття. Утворення філаментів та інших елементів структури Всесвіту знайшло пояснення в рамках теорії Зельдовича, яка легла в основу подальших комп'ютерних космологічних симуляцій. У змодельованих розподілах галактик виявлення філаментів є досить успішним, але спостереження реальних галактик виявились набагато менш придатними для даної задачі. Найкращі спостережені дані про розподіл галактик містить Слоанівський Цифровий Огляд Неба. Застосування до даного огляду різних методів виявлення філаментів дає результати, що наразі не узгоджуються між собою. Навіть аналіз морфології філаментів, що утворюють Місцеве Надскупчення галактик, викликає ряд запитань. Основна складність пошуків філаментів полягає у тому, що вони складаються переважно з темної матерії. Рентгенівські зображення скупчень галактик допомагають оптичні і допомагають визначити розподіл темної матерії. Орієнтація рентгенівського гало і оптичних галактик скупчення може вказувати на найближчі філаменти. Для визначення ступеня вираження даного ефекту необхідний попередній загальний аналіз орієнтацій галактик. Виконаний огляд сучасних наукових робіт включає моделі скупчення на перетині філаментів і скупчень, що нанизані на філамент. Деталі взаємозв'язку скупчень галактик і філаментів можуть бути визначені лише в результаті проведення і аналізу нових спостережень великомасштабної структури Всесвіту, а також розробки і застосування нових алгоритмів для обробки спостережень, що базуються на фізично коректних теоріях розвитку космологічних неоднорідностей.

Ключові слова: взаємодіючі галактики; рентгенівське випромінювання; індивідуальні галактики.

1. ПРОБЛЕМА ФІЛАМЕНТІВ

Уявлення про комірчасту великомасштабну структуру Всесвіту давно визнане як важлива складова астрономічної картини світу. Для спостережень найбільш доступним є оптичне випромінювання галактик, але значно більша маса зосереджена у темній матерії. Темну матерію можна виявляти за потоками галактик, гравітаційним линзуванням, рентгенівським випромінюванням скупчень, ефектом Сюняєва–Зельдовича та іншими методами. Просторова структура космічної павутини відображається в першу чергу у ниткоподібних філаментах. Скупчення галактик займають малий об'єм, войди містять малу кількість галактик, а стіни складаються з філаментів. За структурою космічної павутини можна визначити властивості темної матерії, закономірності розширення Всесвіту, перевірити теорію інфляції.

В основі теорії структури Всесвіту лежать два принципи: гіпотеза про гаусівський розподіл початкових збурень густини і наближення Зельдовича, у рамках якого можна описати їх еволюцію [48]. Більшість методів опису великомасштабної структури тестуються на чисельних моделях і лише деякі методи застосовуються до реальних спостережних оглядів. Сучасні методи визначення філаментів викладено у роботі [28].

Найбільш придатним для дослідження великомасштабних структур є Слоанівський Цифровий Огляд Неба (Sloan Digital Sky Survey, SDSS). Найбільш розробленим методом виявлення космічних структур у SDSS та інших оглядах є топологічний метод Соусбі (2011) DisPerSe [42].

Алгоритм DisPerSe використовує теселяції Делоне і густину DTFE для кожної тестової частинки. Ідея методу полягає у використанні засобів дискретної теорії Морса (підрозділ обчислювальної топології). Даний метод виявлення структур дозволяє врахувати внутрішню невизначеність і шум Пуасона. Метод забезпечує детектування структур для фіксованого, наперед заданого рівня значущості. Метод також цікавий з геометричної точки зору, оскільки додатково дозволяє визначити числа Бетті і характеристики Ейлера досліджуваного розподілу галактик. Густина розподілу у даному методі використовується як дискретна функція Морса, оскільки вона обернено пропорційна об'єму відповідної комірки Вороного. Після визначення функції Морса від неї обчислюється градієнт і визначається дискретний комплекс Морса–Смейла. Його критичні точки і вважаються структурними елементами. Для верифікації алгоритму отриманий комплекс необхідно відфільтрувати за допомогою теорії відповідності. При цьому теселяції фільтруються відповідно до значень густини. На останньому етапі відкидаються пари структур, що генеруються шумом. Для всіх пар обчислюється імовірність значущості з використанням

Тугай Анатолій Володимирович; ✉ tugay.anatoliy@gmail.com

Вісник Астрономічної школи, 2018, том 14, № 2

87

гаусівських випадкових полів. В результаті застосування вищеописаного методу до даних SDSS у [42] була отримана структура войдів з кількістю деталей, що набагато перевищує кількість спостережуваних галактик.

У роботі Темпеля та ін. [44] для виявлення філаментів був використаний метод апроксимації розподілу галактик циліндрами. У результаті простір, охоплений SDSS, був заповнений короткими філамен- тами, переважно з двох галактик. Бачимо кардинально різний поділ того ж самого спостережуваного об'єму на філаменти. Незважаючи на неоднозначність виявлення філаментів, Лаглі [26] розвинув теорію перерізу філамента, при тому що вздовж філамента спостерігається в кращому випадку 10 галактик. Такі неоднозначності алгоритмів і спостережні обмеження вимагають розробки більш досконалих мето- дів виявлення філаментів. Можна запропонувати два варіанти. Перший полягає у тому, щоб виявляти філаменти у радіальних шарах товщиною не більше 100 Мпк [7]. Це дозволить компенсувати вплив пекулярних швидкостей галактик у локальних гравітаційних полях і розв'язувати спрощену двовимір- ну задачу. Другий метод полягає у представленні видимого розподілу галактик як гаусівського поля густини [52]. Це дозволить визначити статистичні характеристики філаментів, а отже, описати велико- масштабну структуру Всесвіту у цілому. Можливо, один з названих методів допоможе у майбутньому краще визначити розподіл філаментів. На сьогодні ж найбільш достовірно виявлені найближчі філаменти Місцевого Надскупчення [23], що пов'язані зі скупченням галактик Virgo.

Про рентгенівські філаменти можна сказати наступне. Цікаво було б використати рентгенівські ску- пчення для пошуку філаментів темної матерії. Дітріх [9] шукав філаменти поблизу рентгенівських скупчень, але наразі рентгенівські філаменти знайдені не були. Згідно передбачень космологічної моделі CDM скупчення лежать на перетині філаментів. Тепло-гаряче міжгалактичне середовище дозволяє спо- стерігати близькі філаменти. Філамент Abell 222/223 виявлений за слабким гравітаційним лінзуванням. Він співпадає з надлишком галактик і м'яким рентгеном. Має масу ще одного скупчення галактик. Плазма світиться на 1 кеВ і дає масу філамента.

Бачимо, що різні методи дають різні філаменти. Щоб достовірно знайти реальні філаменти, треба розробляти нові методи. У цьому можуть допомогти дослідження орієнтацій галактик.

2. ОРІЄНТАЦІЯ ГАЛАКТИК

Питання про орієнтацію позагалактичних туманностей ставилося з перших десятиліть після визна- чення їх природи [53]. В одній з перших робіт з виявлення анізотропії орієнтації галактик Хаулі і Піблс [18] розглядається припущення про те, що галактики у скупченні мають бути орієнтовані до центру. Відкриття Вокульором першої виділеної площини у міжгалактичному просторі, Супергалакти- ки, спонукало його до порівняння орієнтацій галактик відносно неї. Подальші дослідження Місцевого Надскупчення, проведені Рейнхардтам і Робертсом [39], показали, що його галактики мають виділений напрямок осей, перпендикулярний до супергалактичної площини. Теоретичне підґрунтя закономір- стей орієнтації галактик заклав Шандарін, який припустив [40], що за орієнтаціями можна розрізнити адіабатичну і турбулентну теорії утворення галактик.

Сучасний розгляд ефектів орієнтації галактик почався з роботи Бінгеллі [4], у якій був проана- лизований вплив оточення на орієнтацію галактики. Починаючи з 1980-х років орієнтація галактик у Місцевому Надскупченні стала предметом розгляду в ряді робіт [11, 21, 29, 30]. Чисельне моделюван- ня анізотропії орієнтації галактик, виявленої у вищевказаних роботах, показало [29], що не випадкова орієнтація є не ефектом проекції, а фізичним ефектом. Статистичний аналіз показав, що великі осі галактик мають тенденцію орієнтації на центр скупчення. У результаті подальших досліджень сфор- мувалося уявлення [30] про те, що надскупчення формуються раніше галактик. Капранідіс і Салліван у роботі [21] показали, що галактики у Місцевому Надскупченні орієнтовані випадково. Натомість, Флін і Годловський [11] отримали протилежний результат, згідно якого галактики перпендикулярні до площини Надскупчення.

Серед досліджень орієнтації галактик у Місцевому Надскупченні у 1990-х роках слід відзначити роботи [12], [14], [15] та [55]. Кашикава і Окамура [22] виявили наступні закономірності. Осі обер- тання галактик, що розташовані в площині Надскупчення, самі орієнтовані в площині Місцевого Над- скупчення. Галактики, які знаходяться за межами площини Надскупчення мають осі, що орієнтовані перпендикулярно до супергалактичної площини. Поблизу скупчення Вірго осі галактик спрямовані на його центр. Годловський [14, 15] і Юань та ін. [54] підтвердили ці результати.

Орієнтація галактик Упсальського каталога (частина яких виходить за межі Місцевого Надску- пчення) була розглянута у роботі Манджоса та ін. [31]. Опрацьовані дані виявились недостатніми для чіткого висновку щодо відповідності осей галактик площині Надскупчення. Кіндл [24] прийшов до ви- сновку, що орієнтації випадкові відповідно до дисипативної моделі утворення галактик. У доповіді [12] П.Флін розглянув орієнтацію галактик у надскупченнях. Він підтвердив, що осі спіралей лежать в пло- щині надскупчення, що свідчить на користь дисипативної моделі і проти турбулентної. Ламбас та ін. [27] визначили статистичні закономірності орієнтації галактик і показали, що еліптичні галактики видовжені

вздовж великомасштабних структур, а спіральні загалом хаотично. Бухарі [6] запропонував емпіричний метод визначення орієнтації скупчень і застосував його до скупчення галактик Кома у сузір'ї Волосся Вероніки.

Орієнтація скупчень галактик і орієнтація галактик у скупченнях розглядалася у роботах [13, 33, 45, 50], починаючи з 1990 року. Фонг та ін. визначили [13], що скупчення вказують одне на інше, якщо відстань між ними менше 4 Мпк. Ван Кампен і Рі припустили [50], що центральна галактика скупчення може вказувати туди ж, куди і скупчення. Тревес, Кілімель і Флін виявили навіть більше, а саме [45], що скупчення і дві його найяскравіші галактики орієнтовані вздовж осі, що їх з'єднує. Муріель і Ламбас [33] провели порівняння кутів між осями галактик і напрямками на сусідню галактику, але не надали належної інтерпретації отриманих результатів.

Нові результати щодо орієнтації галактик Місцевого Надскупчення представлені в огляді [19]. Янг та ін. [54] узгодили орієнтацію галактики з розташуванням її супутників. Вони показали, що у групах SDSS червоні галактики мають спільну орієнтацію. У препринті [41] розглядалося подібне питання для окремих галактик Слоанівського огляду. Було показано, що супутники гігантських червоних галактик орієнтуються відповідно до них на відстанях до $Hr = 600$ км/с. Такий же результат був підтверджений у роботі [1] для ізольованих галактик SDSS і комп'ютерного моделювання Millenium.

Дослідження впливу великомасштабної структури на орієнтацію галактик почалися з роботи Тружил-ло та ін. [46]. За даними 2dF і SDSS автори показали, що осі обертання галактик лежать у поверхнях, що оточують войди. Також дана група науковців отримала результати щодо орієнтації гало темної матерії навколо войдів [5] і аналітичного пояснення орієнтації [52]. Вищезазначений ефект був виявлений також у моделюванні Millenium. У роботі [52] визначалася орієнтація дискових галактик навколо войдів. Було підтверджено закономірності орієнтації галактик навколо войдів SDSS до червоного зміщення 0,12. Нарешті, у роботі [25] виконано моделювання субгало темної матерії навколо Молочного Шляху і показано, що вони вказують на центр Галактики.

У роботі Парновського та ін. [36] був викладений новий метод визначення анізотропії орієнтації дискових галактик. Він був застосований до каталогу плоских галактик 2MFGC [37]. В результаті були виявлені ознаки анізотропії орієнтації плоских галактик. Хан та ін. [16] побудували модель міжгалактичного філамента і показали, що осі обертання дискових галактик орієнтовані вздовж філамента. Даний результат є лише одним з прикладів взаємозв'язку орієнтації галактик і структури філаментів. Звичайно, не в усіх випадках такий взаємозв'язок легко виявити. Так, Хан та ін. [17] в результаті досліджень орієнтації галактик у філаменті Великої Ведмедиці показали, що ця орієнтація випадкова. З іншого боку, Сплінтер та ін. [43] за допомогою власної моделі орієнтацій визначили, що сусідні скупчення галактик вказують одне на інше відстанях до 15 Мпк, що у свою чергу може розглядатися як ознака існування філамента темної матерії між ними. Фалтенбахер та ін. [10] в результаті визначення орієнтації скупчень підтвердили висновки [43] і виявили, що галактики у філаменті явно вказують на найближче скупчення. Пімблетт [38] розробив алгоритм виявлення філаментів за орієнтацією. Було показано, що скупчення на відстані до 15 Мпк, як правило, з'єднані філаментом. Олена Панько зі співавторами дослідила орієнтацію південних галактик [34, 35], побудувала нові каталоги скупчень і надскупчень галактик та встановила взаємозв'язки морфології і орієнтації великомасштабних структур.

Важливою задачею є визначення орієнтації позагалактичних об'єктів за рентгенівськими зображеннями. Зокрема, рентгенівські гало скупчень відображають розподіл міжгалактичної темної матерії і можуть вказувати на найближчі філаменти або інші елементи великомасштабної структури. Перша спроба визначення орієнтації рентгенівських скупчень була виконана у роботі МакМіллана та ін. [32]. В цій роботі відмічається суттєва кількість проблем виявлення орієнтації, але немає опису можливих закономірностей такої орієнтації. Орієнтація ряду рентгенівських скупчень Ейбелла була визначена у роботі [48]. Турнер та ін. [47] визначили орієнтацію ряду сейфертівських галактик 2 типу за рентгенівськими спостереженнями. Додатково проведено порівняння рентгенівських спектрів галактик Сейферта 1 і 2 типу та співставлення з особливостями орієнтації.

Підсумовуючи результати досліджень великомасштабної структури, можна зробити наступні висновки [2]. Гало темної матерії, згідно найбільш поширених уявлень, орієнтовані вздовж філаментів галактик [20, 57]. Галактики можуть орієнтуватися або вздовж філамента або перпендикулярно. Скупчення мають тенденцію орієнтуватись вздовж філамента. Принаймні, їх орієнтація має вказувати на найближче скупчення, що є виразом ефекта Бінгеллі.

3. ВИСНОВКИ

Без прямої реєстрації просторового розподілу темної матерії можна окреслити лише найбільш загальні закономірності просторового розподілу і орієнтації великомасштабних космічних структур. Майбутні астрономічні спостереження у різних діапазонах випромінювання дозволять детальніше дослідити параметри великомасштабної структури Всесвіту і вдосконалити наявні космологічні моделі.

1. *Agustsson I., Brainerd T.G.* Anisotropic Locations of Satellite Galaxies: Clues to the Orientations of Galaxies within their Dark Matter Halos // *Ap. J.* — 2010. — Vol. 709. — P.1321–1336.
<https://doi.org/10.1088/0004-637x/709/2/1321>
2. *Aragon-Calvo M.A., Yang L.F.* The hierarchical nature of the spin alignment of dark matter haloes in filaments // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.: Letters.* — 2014. — Vol. 440. — P.46–50.
<https://doi.org/10.1093/mnrasl/slu009>
3. *Betancort-Rijo J.E., Trujillo I.* An analytical framework to describe the orientation of dark matter halos and galaxies within the large-scale structure // *arXiv:0912.1051*.
4. *Binggeli B.* The shape and orientation of clusters of galaxies // *As. Ap.* — 1982. — Vol. 107. — P.338–349.
5. *Brunino R., Trujillo I., Pearce F.R., Thomas P.A.* The orientation of galaxy dark matter haloes around cosmic voids // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2007. — Vol. 375. — P.184–190.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.11282.x>
6. *Bukhari F.A.* Empirical determination of the apparent shapes and orientations of galaxy clusters // *Ap. J.* — 1988. — Vol. 333. — P.561–563. <https://doi.org/10.1086/166766>
7. *Chen Y., Ho S., Brinkmann J., et al.* Cosmic web reconstruction through density ridges: catalogue // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 461. — P.3896–3909.
<https://doi.org/10.1093/mnras/stw1554>
8. *Chon G., Bohringer H., Zaroubi S.* On the definition of superclusters // *As. Ap.* — 2015. — Vol. 575. — id.L14. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201425591>
9. *Dietrich J.P., Werner N., Clowe D.* A filament of dark matter between two clusters of galaxies // *Nature.* — 2012. — Vol. 487. — P.202–204. <https://doi.org/10.1038/nature11224>
10. *Faltenbacher A., Gottlöber S., Kerscher M., Müller V.* Correlations in the orientations of galaxy clusters // *As. Ap.* — 2002. — Vol. 395. — P.1–9. <https://doi.org/10.1051/0004-6361:20021263>
11. *Flin P., Godlowski W.* The orientation of galaxies in the Local Supercluster // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 1986. — Vol. 222. — P.525–541. <https://doi.org/10.1093/mnras/222.3.525>
12. *Flin P.* The Orientation of Galaxies in Superclusters // *IAUS.* — 1988. — Vol. 130. — P.239.
13. *Fong R., Stevenson P.R.F., Shanks T.* The orientation of galaxies and of clusters from an objectively defined catalogue // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 1990. — Vol. 242. — P.146.
<https://doi.org/10.1093/mnras/242.2.146>
14. *Godlowski W.* Galactic Orientation Within the Local Supercluster // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 1993. — Vol. 265. — P.874–880. <https://doi.org/10.1093/mnras/265.4.874>
15. *Godlowski W.* Some aspects of the galactic orientation within the Local Supercluster // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 1994. — Vol. 271. — P.19–30. <https://doi.org/10.1093/mnras/271.1.19>
16. *Hahn O., Teyssier R., Carollo C.M.* The large-scale orientations of disc galaxies // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2010. — Vol. 405. — P.274–290. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.16494.x>
17. *Han C., Gould A., Sackett P.D.* The orientation of spin vectors of galaxies in the Ursa Major filament // *Ap. J.* — 1995. — Vol. 445. — P.46–54. <https://doi.org/10.1086/175671>
18. *Hawley D.L., Peebles P.J.E.* Selection Effects and the Distribution of Orientations of Galaxies // *Bulletin of the Americal Astronomical Society.* — 1972. — Vol. 4. — P.239.
19. *Hu F.X., Wu G.X., Song G.X., et al.* Orientation of Galaxies in the Local Supercluster: A Review // *Ap&SS.* — 2006. — Vol. 302. — P.43–59. <https://doi.org/10.1007/s10509-005-9006-7>
20. *Joachimi B., Cacciato M., Kitching T.D.* Galaxy Alignments: An Overview // *Space Science Reviews.* — 2015. — Vol. 193. P. 1–65. <https://doi.org/10.1007/s11214-015-0177-4>
21. *Kapranidis S., Sullivan W.T.* The orientation in space of spiral galaxies in the local supercluster // *As. Ap.* — 1983. — Vol. 118. — P.33–38.
22. *Kashikawa N., Okamura S.* Spatial orientation of spin vectors of galaxies in the Local Supercluster // *PASJ.* — 1992. — Vol. 44. — P.493–507.
23. *Kim S., Rey S., Bureau M., et al.* Large-scale Filamentary Structures around the Virgo Cluster Revisited // *Ap. J.* — 2016. — Vol. 833. — id. 207. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/833/2/207>
24. *Kindl E.* Observations and models of galaxy orientations // *Astron. J.* — 1987. — Vol. 93. — P.1024–1034.
<https://doi.org/10.1086/114385>
25. *Kuhlen M., Diemand J., Madau P.* The Shapes, Orientation, and Alignment of Galactic Dark Matter Subhalos // *Ap. J.* — 2007. — Vol. 671. — P.1135–1146. <https://doi.org/10.1086/522878>
26. *Laigle C., Pichon C., Codis S., et al.* Swirling around filaments: are large-scale structure vortices spinning up dark haloes? // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2015. — Vol. 446. — P.2744–2759.
<https://doi.org/10.1093/mnras/stu2289>
27. *Lambas D.G., Groth E.J., Peebles P.J.E.* Statistics of galaxy orientations. — Morphology and large-scale structure // *Astron. J.* — 1988. — Vol. 95. — P.975–984. <https://doi.org/10.1086/114693>

28. *Libeskind N., van de Weygaert R., Cautun M., et al.* Tracing the cosmic web // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2018. — Vol. 473. — P.1195–1217. <https://doi.org/10.1093/mnras/stx1976>
29. *MacGillivray H.T., Dodd R.J., Lightfoot J.F., et al.* Monte-Carlo simulation of the orientations of galaxies in clusters // *Ap&SS.* — 1980. — Vol. 70. — P.385–392. <https://doi.org/10.1007/bf00639562>
30. *MacGillivray H.T., Dodd R.J., McNally B.V., Corwin H.G.Jr.* Orientations of galaxies in the Local Supercluster // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 1982. — Vol. 198. — P.605–615. <https://doi.org/10.1093/mnras/198.2.605>
31. *Mandzhos A.V., Telnyuk-Adamchuk V.V., Gregul A.Y.* Anisotropies in the Orientation of the Uppsala and Eso/upsala Galaxies // *Soviet Astronomy Letters.* — 1985. — Vol. 11. — P.206–209.
32. *McMillan S.L.W., Kowalski M.P., Ulmer M.P.* The Determination of Orientations and Ellipticities of X-ray Images of Galaxy Clusters // *BAAS.* — 1987. — Vol. 19. — P.1080.
33. *Muriel H., Lambas D.G.* Systematics in the Orientation of Galaxies and Clusters of Galaxies // *Astronomical Society of the Pacific Conference Series.* — 1993. — Vol. 51. — P.119.
34. *Panko E., Juszczyk T., Flin P.* Orientation of Brighter Galaxies in Nearby Galaxy Clusters // *Astron. J.* — 2009. — Vol. 138. — P.1709–1713. <https://doi.org/10.1088/0004-6256/138/6/1709>
35. *Panko E., Piwowarska P.* Orientation of galaxies in structures // *Astrophysics.* — 2013. — Vol. 56. — P.322–331. <https://doi.org/10.1007/s10511-013-9288-3>
36. *Parnovsky S.L., Karachentsev I.D., Karachentseva V.E.* Global Anisotropy in Galaxy Orientations // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 1994. — Vol. 268. — P.665–680. <https://doi.org/10.1093/mnras/268.3.665>
37. *Parnovsky S.L., Tugay A.V.* Orientation Anisotropy of 2MFGC Galaxies // *Journal of Physical Studies.* — 2008. — Vol. 11. — P.366–369.
38. *Pimblet K.A.* A new algorithm for the detection of intercluster galaxy filaments using galaxy orientation alignments // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2005. — Vol. 358. — P.256–262. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2005.08780.x>
39. *Reinhardt M., Roberts M.S.* Orientation of Galaxies and the Local Supercluster // *Astrophysical Letters.* — 1972. — Vol. 12. — P.201–206.
40. *Shandarin S.F.* Orientation of angular momenta of galaxies // *Soviet Astronomy.* — 1974. — Vol. 18. — P.392–393.
41. *Siverd R.J., Ryden B.S., Gaudi B.S.* Galaxy Orientation and Alignment Effects in the SDSS DR6 // *arXiv:0903.2264.*
42. *Sousbie T., Pichon C., Kawahara H.* The persistent cosmic web and its filamentary structure. — II. Illustrations // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2011. — Vol. 414. — P.384–403. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2011.18395.x>
43. *Splinter R.J., Melott A.L., et al.* The Ellipticity and Orientation of Clusters of Galaxies in N-Body Experiments // *Ap. J.* — 1997. — Vol. 479. — P.632–641. <https://doi.org/10.1086/303896>
44. *Tempel E., Stoica R. S., Martinez V.J., et al.* Detecting filamentary pattern in the cosmic web: a catalogue of filaments for the SDSS // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* — 2014. — Vol. 438. — P.3465–3482. <https://doi.org/10.1093/mnras/stt2454>
45. *Trevese D., Cirimele G., Flin P.* The orientation of galaxies in clusters // *Astron. J.* — 1992. — Vol. 104. — P.935–940. <https://doi.org/10.1086/116286>
46. *Trujillo I., Carretero C., Patiri S.G.* Detection of the Effect of Cosmological Large-Scale Structure on the Orientation of Galaxies // *Ap. J. L.* — 2006. — Vol. 640. — P.111–114. <https://doi.org/10.1086/503548>
47. *Turner T.J., George I.M., Nandra K., Mushotzky R.F.* ASCA Observations of Type 2 Seyfert Galaxies. III. Orientation and X-Ray Absorption // *Ap. J.* — 1998. — Vol. 493. — P.91–101. <https://doi.org/10.1086/305117>
48. *Shevchenko S.Yu., Tugay A.V.* Determination of the galaxy cluster orientation using X-ray images by FOCAS method // *Odessa Astronomical Publications.* — 2017. — Vol. 30. — P.45–47. <https://doi.org/10.18524/1810-4215.2017.30.114263>
49. *van de Weygaert Rien* Froth across the Universe Dynamics and Stochastic Geometry of the Cosmic Foam // *Proceedings 2nd Hellenic Cosmology Workshop*, eds. M. Plionis, S. Cotsakis, I. Georgantopoulos. — Kluwer, 2002. — 153 pages. *ArXiv:astro-ph/0206427*
50. *van Kampen E., Rhee G.F.R.N.* Orientation of bright galaxies in Abell clusters // *As. Ap.* — 1990. — Vol. 237. — P.283–295.
51. *Varela J., Betancort-Rijo J., Trujillo I., Ricciardelli E.* The Orientation of Disk Galaxies around Large Cosmic Voids // *Ap. J.* — 2012. — Vol. 744. — id. 82. <https://doi.org/10.1088/0004-637x/744/2/82>
52. *Voitsekhouvski V.V., Tugay A.V.* Simulation of large-scale structure of Universe by Gaussian random fields // *Odessa Astronomical Publications.* — 2018. — Vol. 31. — P.52–55.

<https://doi.org/10.18524/1810-4215.2018.31.144752>

53. Walker A.G. The orientation of extragalactic nebulae // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. — 1940. — Vol. 100. — P.623–630. <https://doi.org/10.1093/mnras/100.8.623>
54. Yang X., van den Bosch F.C., Mo H.J., et al. The alignment between the distribution of satellites and the orientation of their central galaxy // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. — 2006. — Vol. 369. — P.1293–1302. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10373.x>
55. Yuan Q.R., Hu F.X., Su H.J., Huang K.L. Orientation of the Field Galaxies in the Local Supercluster // Astron. J. — 1997. — Vol. 114. — P.1308–1312. <https://doi.org/10.1086/118564>
56. Zhang Y., Yang X., Faltenbacher A., et al. The Spin and Orientation of Dark Matter Halos Within Cosmic Filaments // Astrophysical Journal. — 2009. — Vol. 706. — P.747–761. <https://doi.org/10.1088/0004-637x/706/1/747>

Филаменты темной материи

Тугай А.В.

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

Данная работа представляет собой обзор проблемы выявления межгалактических филаментов и определения ориентации галактик. Филаменты рассматриваются как элемент крупномасштабной структуры Вселенной с середины прошлого столетия. Образование филаментов и других элементов структуры Вселенной описано в теории Зельдовича, которая легла в основу последующих компьютерных космологических симуляций. Для модельных распределений галактик выявление филаментов не вызывает проблем, однако данные наблюдений реальных галактик оказались намного менее пригодными для данной задачи. Лучшие наблюдательные данные о распределении галактик содержит Слоановский Цифровой Обзор Неба. Применение к данному обзору различных методов детектирования филаментов дает противоречивые результаты. Более того, даже морфологический анализ филаментов, образующих Местное Сверхскопление галактик, вызывает ряд вопросов. Главная трудность поисков филаментов заключается в том, что они состоят преимущественно из темной материи. Рентгеновские изображения скоплений галактик дополняют оптические и дают возможность определять распределение темной материи. Ориентация рентгеновского гало и оптических галактик скопления может указывать на ближайшие филаменты. Для определения степени выраженности данного эффекта необходим предварительный общий обзор ориентаций галактик. Выполненный обзор современных работ указывает на модели скопления на пересечении филаментов и скоплений, нанизанных на филамент. Детали взаимосвязи скоплений галактик и филаментов могут быть определены лишь в результате проведения и анализа новых наблюдений крупномасштабной структуры Вселенной и применения новых алгоритмов обработки наблюдений, базирующихся на актуальных теориях эволюции космологических возмущений.

Ключевые слова: крупномасштабная структура Вселенной; скопления галактик.

Dark matter filaments

Tugay A.V.

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

Present work is a review of extragalactic filament detection and galaxy orientation. Filaments are considered as a part of large-scale structure of Universe since the middle of XX century. The formation of filaments and other elements of large-scale structure was described in Zeldovich theory, which became the base of further computer cosmological simulations. Simulated galaxy distributions are quite suitable for filament detection, but the observations of real galaxies appears much less appropriate for this task. Sloan Digital Sky Survey contains the best data of galaxy distribution for the studies of large-scale structures. Application of different methods of filament detection to SDSS leads to contradictory results. Even morphological analysis of Local Supercluster filaments causes a number of questions. The main complexity of filament search is their composition of mostly dark matter. X-ray images of galaxy clusters supplements optical ones and can help to determine dark matter distribution. Orientation of X-ray halo and optical galaxies in the cluster may point out to the nearest filaments. General analysis of galaxy orientations is needed for the evaluation of this effect. Our review shows models of galaxy cluster at the intersection of filaments and the thread of clusters on the filament. Details of galaxy cluster and filament connections may be revealed after new observations of large-scale structure of Universe and applications new data processing algorithms and cosmological theories of the fluctuation growth.

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

Надійшла до редакції / Received	10.09.2018
Виправлена авторами / Revised	13.12.2018
Прийнята до друку / Accepted	19.12.2018