

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ І. І. МЕЧНИКОВА

Факультет математики, фізики та інформаційних технологій

Кафедра фізики та астрономії

Кваліфікаційна робота

на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

«Внутрішня будова скупчень галактик, що належать до надскупчень галактик»

“ The inner structure of galaxy clusters belonging to superclusters of galaxies ”

Виконав: здобувач денної форми навчання

спеціальності 104-Фізика та астрономія

Освітня програма Фізика та астрономія

Коршунов Валерій Миколайович

Керівник д.ф.-м.н., проф. Панько О.О. _____
(підпис)

Рецензент д.ф.-м.н., проф. Андронов І.Л.

Рекомендовано до захисту:
протокол засідання кафедри
фізики та астрономії _____
№ ____ від ____ . ____ . 20 ____ р.

Захищено на засіданні ЕК № _____
протокол № ____ від ____ . ____ . 20 ____ р.
Оцінка _____ / _____ / _____
(за національною шкалою/шкалою ECTS/ бали)

Завідувач кафедри
_____ ГОЦУЛЬСЬКИЙ Володимир
(підпис)

Голова ЕК
_____ ГОЦУЛЬСЬКИЙ Володимир
(підпис)

Одеса 2024

ЗМІСТ

ЗМІСТ	2
ВСТУП.....	3
1. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ВЕЛИКОМАСШТАБНОЇ СТРУКТУРИ ВСЕСВІТУ	5
1.1. Спостереження елементів Великомасштабної структури Всесвіту	5
1.2. Космологічні комп'ютерні моделювання	7
1.3. Дослідження внутрішньої структури скупчень галактик.....	8
2. СПОСТЕРЕЖНИЙ МАТЕРІАЛ І МЕТОД АНАЛІЗУ	10
2.1. Каталог скупчень і груп галактик.....	10
2.2. Дослідження внутрішньої структури скупчень галактик за допомогою інструменту «Cluster Cartography»	12
3. ПІДСТРУКТУРИ У СКУПЧЕННЯХ ГАЛАКТИК, ЩО НАЛЕЖАТЬ ДО НАДСКУПЧЕНЬ ГАЛАКТИК	16
3.1. Характерні скупчення типів С, І та О.....	16
3.2. Лінійні підструктури у скупченнях галактик.....	18
3.3. Роль найяскравіших галактик у скупченнях галактик.....	19
3.4. Регулярні підструктури та особливості.....	20
РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ.....	24
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	26
Додаток А. Список скупчень галактик, які належать до надскупчень, та їхні морфологічні типи.....	31

ВСТУП

Дослідження Великомасштабної структури Всесвіту є однією з найважливіших галузей сучасної космології та астрофізики. Її вивчення дозволяє отримати глибоке розуміння фундаментальних властивостей Всесвіту, його складу, історії та еволюції.

Згідно з сучасною космологічною моделлю Λ CDM, первинні адіабатичні флуктуації густини на ранніх етапах формування Всесвіту зумовлюють неоднорідності в розподілі речовини, що випромінює. Згущення баріонної матерії (галактики, скупчення та надскупчення галактик) відповідають областям додатних варіацій, тоді як у областях від'ємних варіацій утворюються порожнини (войди). Дані про розподіл матерії у Всесвіті допомагають уточнити параметри космологічних моделей, зокрема, параметри Λ CDM моделі.

Основними індикаторами розподілу баріонної матерії у Всесвіті є галактики та утворені ними більші структури: групи галактик, скупчення галактик, надскупчення і комплекси надскупчень (філаменти, стіни). Підвищена концентрація галактик у цих структурах зазвичай відповідає областям збільшеної густини міжгалактичного газу та небаріонної матерії (темної матерії).

Скупчення галактик є найбільшими структурами у Всесвіті, час віриалізації яких менший за вік Всесвіту. Їхня внутрішня структура слугує маркером локальних еволюційних процесів. У надскупченнях скупчення галактик розташовані в тісному сусідстві, що впливає на їхні морфологічні особливості. Відповідно до цього, при дослідженні внутрішньої структури скупчень галактик можна знайти маркери різних стадій їх еволюції.

Вивчення та опис у чисельних показниках особливостей розподілу галактик у скупченнях, їх кількісного та якісного складу дозволяє порівнювати спостережувані дані з результатами комп'ютерного моделювання в межах різних космологічних моделей.

Зважаючи на важливість вивчення елементів Великомасштабної структури Всесвіту, метою цієї роботи є дослідити внутрішню структуру скупчень галактик у багатих надскупченнях. Основні завдання, які необхідно вирішити в роботі:

- відпрацювати метод морфологічної класифікації скупчень галактик із використанням пакету «Cluster Cartography»;
- проаналізувати двомірний розподіл галактик у скупченнях каталогу PF;
- дослідити розподіл і роль найяскравіших галактик у скупченні;
- провести опис внутрішньої структури скупчень вибірки, що досліджується;
- встановити еволюційний статус кожного скупчення.

Як об'єкт дослідження використовуються скупчення галактик у щільних областях.

Предмет дослідження: внутрішня будова окремих скупчень галактик, властивості підструктур.

1. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ВЕЛИКОМАСШТАБНОЇ СТРУКТУРИ ВСЕСВІТУ

У розділі розглядається формування уявлень про Великомасштабну Структуру Всесвіту (далі – ВСВ) та властивостей її елементів – скупчень і надскупчень галактик на основі спостережних даних і комп’ютерних симуляцій. Також описано методику визначення морфологічного типу скупчень галактик як спосіб дослідження їхньої внутрішньої будови.

1.1. Спостереження елементів Великомасштабної структури Всесвіту

Вільям Гершель зробив перші значущі спроби вивчення розподілу речовини у Всесвіті. Паралельно зі створенням карти Галактики [1], він досліджував розподіл туманностей на небесній сфері [2, 3, 4]. У 1864 році Джон Гершель опублікував каталог [5], що містив 5063 туманності. Це дозволило виявити нерівномірності у їх розташуванні: близько третини туманностей знаходилося в 1/8 частині небесної сфери з центром у сузір'ї Діва (Virgo). Сьогодні відомо, що ця область належить до Місцевого надскупчення. Подібні особливості були виявлені й в інших регіонах. У 1899 році Всеволод Стратонов знайшов області підвищеної концентрації туманностей у сузір'ях Центавр і Гідра (Centaurus-Hydra) та Геркулес (Hercules) [6]; у 1908 році Карл Шарльє визначив такі області в сузір'ях Діва (Virgo) та Волосся Вероніки (Coma) [7].

Після встановлення факту існування інших зоряних систем за межами нашої Галактики та визначення частини туманностей як галактик, Едвін Габбл провів підрахунок кількості галактик на 1283 обраних ділянках небесної сфери [8]. Його дослідження виявили нерівномірності у розподілі галактик у різних частинах неба. У 1931 році Гарлоу Шеплі створив каталог, що містив 25 скупчень галактик [9].

Використовуючи дані Паломарського огляду неба, Джордж Ейбел у 1958 році опублікував каталог [10], що включав 2712 скупчень галактик з

координатами $\delta > -27^\circ$. У 1989 році Джордж Ейбел разом з Гарольдом Корвіном і Рональдом Оловіном випустили каталог [11], який містив 4073 скупчення галактик і охоплював все небо. Ейбел застосовував метод варіацій поверхневої густини галактик для складання свого каталогу та розширеного каталогу. Скупчення галактик мало включати не менше 50 галактик у межах зоряних величин від m_z до m_z+3 , де m_z – зоряна величина третьої за яскравістю галактики у цій області. Ці галактики повинні знаходитися в об'ємі з радіусом $1,5h^{-1}$ Мпк.

У період з 1961 по 1968 рік група під керівництвом Фріца Цвікі створила шеститомний атлас галактик та скупчень галактик [12]. У цей атлас увійшли структури значно більших розмірів, ніж звичайні скупчення. У каталозі Цвікі визначав скупчення галактик як замкнений контур на небесній сфері, який окреслює область із підвищеною концентрацією галактик. У межах зоряних величин від m_1 до m_1+3 , де m_1 – зоряна величина найяскравішої галактики у цій області, ця густина мала бути у два рази вищою, ніж у сусідніх областях. У середині контуру мало знаходитися не менше 50 галактик, не враховуючи галактик фону.

Огляд неба CfA2 [13, 14] виявив «комірчасту структуру» Всесвіту, що складається з великих філаментів і войдів. У 1989 році, використовуючи дані цього огляду, Маргарет Геллер виявила масштабне утворення, яке за розмірами відповідало глибині каталогу [15]. Це утворення отримало назву «Велика стіна» (пізніше відома як Велика стіна CfA2). У 2003 році подібну структуру, відому як Велика стіна Слоана [16], було виявлено за допомогою Слоанівського цифрового огляду неба [17].

Скупчення галактик визначають як гравітаційно зв'язані масивні системи, що включають від кількох десятків до кількох тисяч галактик [18]. Крім галактик, які становлять приблизно 5% маси, важливими компонентами скупчень є міжгалактичний газ (близько 10% маси) і темна речовина (приблизно 85% маси). Характерний розмір таких скупчень

становить $4h^{-1}$ Мпк, типова загальна маса знаходиться в діапазоні 10^{14} - 10^{15} сонячних мас ($M_{\odot}$), а дисперсія швидкостей складає 500-800 км/с. Час віріалізації скупчень галактик становить приблизно 10^9 років, що менше за Габблів час.

Надскупчення — це великі структури, що складаються з груп скупчень галактик. Їхні характерні розміри становлять від $10h^{-1}$ до $100h^{-1}$ Мпк. Надскупчення визначаються за пороговим контрастом густини речовини відносно середнього рівня. Найбільший контраст спостерігається між надскупченнями та войдами, які є областями з концентрацією галактик, що значно нижча за середню.

1.2. Космологічні комп'ютерні моделювання

Використання комп'ютерного моделювання дозволяє астрономам досліджувати процеси космологічних масштабів у динаміці та отримувати точні теоретичні передбачення щодо властивостей ВСВ.

Одна з перших великих космологічних симуляцій, — Millennium Run [19] — підтвердила, що галактики формують великі скупчення та інші великомасштабні структури. Мапування даних моделювання чітко показало основні елементи Всесвіту: скупчення галактик, надскупчення, філаменти та войди. Також "комірчаста" структура Всесвіту ставала виразнішою з часом після Великого Вибуху, зі зменшенням червоного зміщення.

Наступні великі симуляції, такі як Illustris Project [20, 21] та EAGLE project [22], проводилися з ще більшою кількістю частинок, що дозволяло враховувати міжгалактичний газ і речовину, яка випромінює світло, в обчисленнях. Це дозволило передбачити, що області підвищеної густини темної речовини на космологічних масштабах відповідають областям підвищеної концентрації галактик та зір.

Результати комп'ютерного моделювання також свідчать про еволюційні процеси в скупченнях галактик, наявність внутрішньої структури, маркерами якої є найяскравіші галактики скупчення. Їхні тип,

положення та орієнтація відносно одна одної та виділених напрямків у скупченні в рамках моделі Λ CDM свідчить про належність до певних характерних підструктур [23].

1.3. Дослідження внутрішньої структури скупчень галактик

При класифікації скупчень галактик в оптичному діапазоні зазвичай використовують такі критерії: кількість галактик у скупченні в певних межах зоряних величин (багатство), концентрація галактик до центру скупчення, наявність яскравих галактик у центрі, наявність неправильних галактик і галактик з особливостями.

За Ейбелом скупчення поділяються на багаті та бідні, правильні (R), проміжні (IR або RI) та неправильні (I) [10]. У Цвікі Ейбеловським типам R, IR/RI, I відповідають компактні, проміжні та розсіяні [12]. Багато параметрів скупчень (форма, наявність яскравих галактик, склад галактик, профіль розподілу густини) знаходяться у зв'язку із цими типами.

Поширена схема класифікації скупчень галактик, запропонована Лаурою Баутц і Вільямом Морганом (далі – BM) [24], враховує роль найяскравішої галактики скупчення. Класу I відповідають скупчення із яскравими cD галактиками; II – наявні яскраві галактики, але менш контрастні за яскравістю з іншими членами скупчення; III – відсутні домінуючі галактики.

Схему класифікації у вигляді камертона у 1971 році запропонували Герберт Руд і Гуммулуру Састрі (далі – RS) [25]. Вона базується на тому, яку структуру утворюють 10 найяскравіших галактик скупчення. Клас cD – скупчення містить одну яскраву домінуючу галактику у центрі. B – скупчення має дві яскраві галактики, що знаходяться на відстані одна від одної не більше 10 діаметрів більшої з них; іноді вони можуть з'єднуватися перемичкою з менших галактик (позначається індексом b). L – три або більше найяскравіших галактик утворюють одну лінію і оточені на малій відносно розмірів скупчення відстані іншими галактиками. F – декілька з 10

найяскравіших галактик скупчення та їх оточення розподілені по площині. С – чотири та більше з 10 найяскравіших галактик розташовані у малому відносно розмірів скупчення околі від його центру. І – галактики розподілені довільно чи без добре визначеного центру. RS схема класифікації у деякому розумінні є гібридною між схемами Цвікі та ВМ: вона враховує як роль найяскравішої галактики, так і розподіл галактик в області скупчення.

У 2002 році Омар Лопец-Круз запропонував інтегровану схему, яка базується на схемах ВМ і RS. Зокрема, він пропонував ввести новий підклас пласких скупчень LF [26].

У 2013 році Олена Панько запропонувала схему детальної класифікації скупчень галактик за морфологією, яка спирається на числові показники [27, 28]. Основними критеріями, за якими проводиться класифікація, є концентрація галактик до центру (класи С-I-O), наявність лінійних чи пласких структур (L), роль найяскравішої галактики (сD) і наявність особливостей (P). Частіше за все скупчення мають комбіновані морфологічні типи (CLcD, ILcD, ILP, OP тощо).

Схеми морфологічної класифікації скупчень галактик є ефективним методом вивчення їхньої внутрішньої структури в оптичному діапазоні. Сучасні концепції враховують багатство скупчення, його концентрацію до центру, наявність підструктур, а також роль і розташування найяскравіших галактик в ньому. Ці параметри пов'язані з кількісним і якісним складом галактик, їх орієнтацією, розподілом міжгалактичного газу та темної речовини в межах скупчення.

2. СПОСТЕРЕЖНИЙ МАТЕРІАЛ І МЕТОД АНАЛІЗУ

У розділі описано джерела даних, на базі яких проведено дослідження, а також методи та засоби їхньої обробки.

Спостережною основою роботи є каталог скупчень і груп галактик PF, сформований на базі каталогу галактик Мюнстерського червоного огляду неба. Для обробки даних за схемою морфологічної класифікації Панько використовувалася програма Cluster Cartography.

Для дослідження було обрано 103 скупчення галактик, які належать до 18 надскупчень із кількістю членів 5 і більше. Очікується, що тісне сусідство з іншими скупченнями впливатиме на їхню внутрішню структуру.

2.1. Каталог скупчень і груп галактик

Мюнстерський червоний огляд неба (далі – MRSS) – великий каталог галактик у червоному спектральному регіоні, що охоплює площу 5 000 квадратних градусів. Він містить позиції, червоні величини, радіуси, еліптичності та позиційні кути близько 5,5 мільйонів галактик [29].

Для каталогу діджиталізовано 217 пластин R Шмідта ESO Southern Sky Atlas з галактичними широтами -45° градусів. Об'єкти були класифіковані автоматично з використанням різних параметрів, але помилки автоматичної класифікації були виявлені шляхом візуальної перевірки. На основі дослідження платівок було створено повний каталог галактик та зір, який містить 5,5 мільйона галактик і 20,2 мільйона зір.

Каталог PF був створений з використанням позицій та величин галактик, наведених у MRSS [30]. Для пошуку структур застосували автоматизовану процедуру на базі тесселяції Вороного [31, 32]. Межа повноти для галактик у MRSS становить $18,3^m$, тому каталог PF включає галактики, які світліші за цей ліміт. Щоб потрапити до каталогу PF, структура повинна мати принаймні 10 членів у діапазоні величин m_z , m_z+3^m . У каталозі перелічені 6188 структур.

Каталог PF містить позиції, радіуси, площі, кількість галактик у межах величин m_z , m_z+3 , оцінку кількості фонових галактик; еліптичність та позиційний кут для кожної структури, а також величини першої, третьої та десятої галактики у структурі, взяті з MRSS.

Метод «Friends-of-Friends» (далі – FoF) був запропонований Маргарет Геллер та Джоном Хакре в 1982 році як загальний метод для пошуку областей з підвищеною густиною [33]. Об'єкт із вибірки, не приписаний до існуючої групи, проходить перевірку. Він належить до групи FoF, якщо знаходиться на певній критичній відстані від будь-якого іншого об'єкту групи:

$$D_{12} = 2 \sin (\theta/2) V/H_0 \leq D_L(V_1, V_2, m_1, m_2) , \quad (1)$$

де

$$V = (V_1 + V_2)/2 , \quad (2)$$

а різниця швидкостей становить:

$$V_{12} = |V_1 - V_2| \leq V_L(V_1, V_2, m_1, m_2) , \quad (3)$$

де V_1 і V_2 відповідають червоним зміщенням досліджуваної галактики та галактики групи, m_1 і m_2 їхні зоряні величини і θ – кутова відстань між об'єктами, H_0 – постійна Габбла.

$$D_L = D_0 \left[\int_{-\infty}^{M_{12}} \Phi(M) dM / \int_{-\infty}^{M_{lim}} \Phi(M) dM \right]^{-\frac{1}{3}} , \quad (4)$$

де

$$M_{lim} = m_{lim} - 25 - 5 \lg (V_F/H_0) , \quad (5)$$

$$M_{12} = m_{12} - 25 - 5 \lg (V/H_0) , \quad (6)$$

$\Phi(M)$ – диференціальна функція світності галактик для вибірки (число галактик на Мпк та інтервал зоряних величин), D_0 – проекція відстані між обраними галактиками у Мпк на певному червоному зміщенні V_F .

Так само

$$V_L = V_0 \left[\int_{-\infty}^{M_{12}} \Phi(M) dM / \int_{-\infty}^{M_{lim}} \Phi(M) dM \right]^{-\frac{1}{3}}. \quad (7)$$

Використання методу FoF передбачає зміну критичної відстані в залежності від відстані до спостерігача (червоного зміщення). У варіації методу FoF, запропонованій Яковом Зельдовичем, ця відстань вважається постійною для всіх даних спостережень [34].

Після знаходження усіх груп, видаляються ті, в яких кількість членів менша за задану.

У 2011 році за допомогою методу FoF на базі даних PF каталогу було виявлено 49 надскупчень, що містять від 4 до 9 скупчень, а також 20 ізольованих скупчень галактик [35]. Пошук проводився на основі вибірки з 1711 скупчень, у яких було не менше 50 галактик.

2.2. Дослідження внутрішньої структури скупчень галактик за допомогою інструменту «Cluster Cartography»

Основними критеріями, за якими проводиться класифікація, є концентрація галактик до центру, наявність лінійних чи плоских структур, роль найяскравішої галактики. Морфологічна класифікація проходить у декілька етапів відповідно до кількісних критеріїв.

Для дослідження радіального розподілу речовини всередині скупчення його поле розділяється на n кілець рівної товщини. Тоді приведена площа S_i i -того кільця:

$$S_i = \frac{1}{n^2} (2i - 1), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (8)$$

при цьому

$$\sum_{i=1}^n S_i = 1. \quad (9)$$

Обчисливши кількість галактик, які потрапляють у кожне кільце отримаємо відповідні частки N_i/N галактик (де N – загальна кількість галактик скупчення). Тоді

$$f_i = \frac{N_i}{N} \frac{1}{S_i} \quad (10)$$

– певна густина радіального розподілу галактик у полі скупчення.

Скупченням, які мають виражену концентрацію галактик до центру – не менше 20% галактик знаходиться у межах $1/3$ еквівалентного радіуса скупчення, відповідає тип С. Скупчення мають проміжну концентрацію до центру – приблизно 50% галактик знаходяться у межах $1/2$ еквівалентного радіуса скупчення – тип І. Якщо скупчення не має визначеного центру концентрації або галактики розташовані довільно, воно відповідає типу О.

Наступним критерієм класифікації є наявність лінійних підструктур у скупченні галактик. Для їх пошуку необхідно розділити поле скупчення на m паралельних смуг рівної ширини. Тоді площа кожної смуги S_j :

$$S_j = 2 \int_{\frac{2(j-1)}{m}-1}^{\frac{2j}{m}-1} \sqrt{1-r^2} dr, \quad j=1,2,\dots, m, \quad (11)$$

при цьому

$$S = \sum_{j=1}^m S_j = 2 \int_{-1}^1 \sqrt{1-r^2} dr = \pi. \quad (12)$$

Аналогічно формулі (10) обчислюється густина розподілу галактик по смугах f_j .

Система смуг обертається так, щоб знайти максимальне значення f_j . При цьому не враховується центральна область із підвищеною концентрацією. Якщо густина в певній смузі суттєво перевищує інші, скупченню відповідає тип L із позначкою, яка відповідає $m - 5, 7, 9, 11$ (тобто ширина смуги складає $1/5, 1/7, 1/9$ або $1/11$ від діаметра скупчення відповідно; L5, L7, L9, L11).

Ще одним критерієм класифікації є визначення ролі найяскравіших галактик скупчення (далі BCM – Brightest Cluster Members). Якщо 1-3 BCM розташовані в центрі скупчення та відрізняються за блиском на 1^m і більше, скупчення належить до типу cD.

Тип Р – скупчення з особливостями внутрішньої структури, які не підпадають під класифікацію. Серед особливостей у скупченнях є ті, що регулярно зустрічаються – це Х- і Y-подібні структури та вигнуті смуги.

Частіше за все скупчення мають комбіновані морфологічні типи (CL9cD, IL7cD, IL5, OP тощо). Якщо у скупченні відсутні лінійні структури, відповідний індекс не присвоюється; якщо у скупченні немає яскравої домінуючої галактики у центрі, відповідний індекс не присвоюється.

Пошук кількісних характеристик скупчень галактик проводиться за допомогою програмного пакету «Cluster Cartography» (далі – СС) Святослава Ємельянова [36].

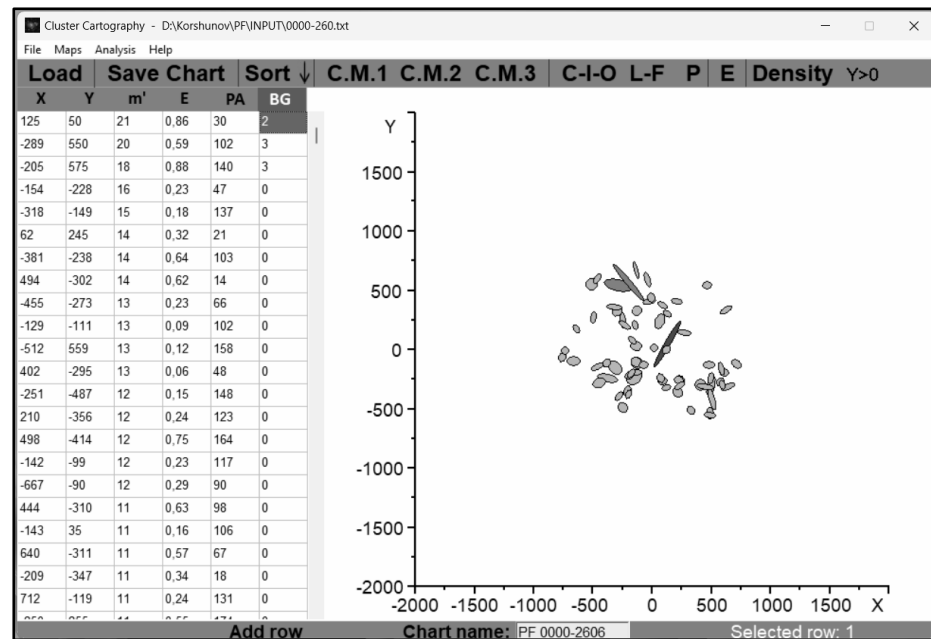


Рис. 1. Інтерфейс програмного пакету «Cluster Cartography»

Дані каталогу PF мають переводитися у певний зручний формат для роботи в СС. Дійсні кутові розміри галактик надто малі в порівнянні з полем скупчення для їхнього використання у мапуванні. Тому параметри символів, які відповідають галактикам, обчислюються за допомогою зоряної величини m і еліптичності E :

$$m' = 3 \cdot 2^{0,6(18,5-m)} + 6; \quad (13)$$

$$2a = \frac{m'}{\sqrt[4]{1-2E+E^2}}; \quad 2b = \frac{(m')^2}{2a}. \quad (14)$$

Коефіцієнти у рівнянні (13) відповідають саме даним MRSS і можуть бути змінені для іншого сету спостережних даних. Рівняння (14) пов'язують розміри еліпса, який позначає галактику, з величиною m' .

Перехід від екваторіальних координат α , δ до прямокутних X , Y відбувається за формулами:

$$X = -206265 \frac{\cos \delta \sin (\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta \sin \delta_0 + \cos \delta \cos \delta_0 \cos (\alpha - \alpha_0)}, \quad (15)$$

$$Y = 206265 \frac{\sin \delta \cos \delta_0 - \cos \delta \sin \delta_0 \cos (\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta \sin \delta_0 + \cos \delta \cos \delta_0 \cos (\alpha - \alpha_0)}, \quad (16)$$

де α_0 , δ_0 – координати центра скупчення.

СС дозволяє, спираючись на кількісні характеристики скупчень галактик, визначати їхні морфологічні класи і, відповідно, ступінь концентрації галактик до центру скупчення, наявність лінійних і регулярних особливих підструктур тощо. Описані критерії знаходяться у зв'язку із іншими параметрами скупчень: кількісний і якісний склад галактик, орієнтації галактик у скупченні, розподіл міжгалактичного газу та темної речовини.

3. ПІДСТРУКТУРИ У СКУПЧЕННЯХ ГАЛАКТИК, ЩО НАЛЕЖАТЬ ДО НАДСКУПЧЕНЬ ГАЛАКТИК

У розділі представлено результати дослідження, а також описано особливості внутрішньої структури окремих пекулярних скупчень галактик.

3.1. Характерні скупчення типів С, І та О

Як було описано в Розділі 2, у скупченнях С-типу виражене підвищення густини розподілу галактик у центрі (рис.2).

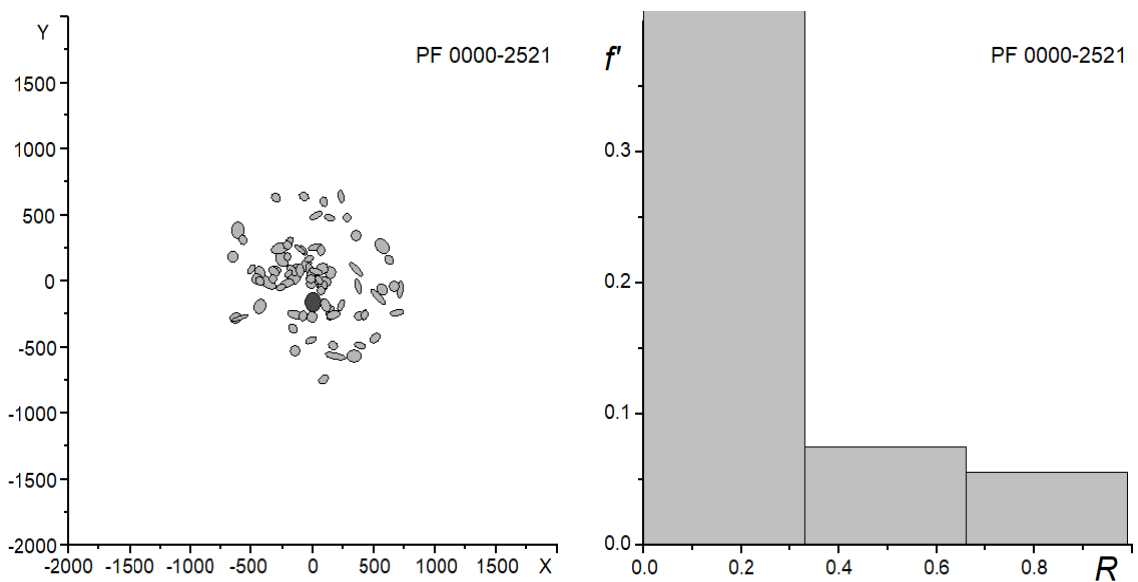


Рис. 2. Скупчення С-типу (лівий) і і радіальний розподіл галактик у ньому (правий)

Скупчення проміжного І-типу мають помітне, але невелике підвищення густини розподілу галактик до центру (рис. 3). Відповідно, більша частина галактик скупчення лежить за межами центрального «кільця».

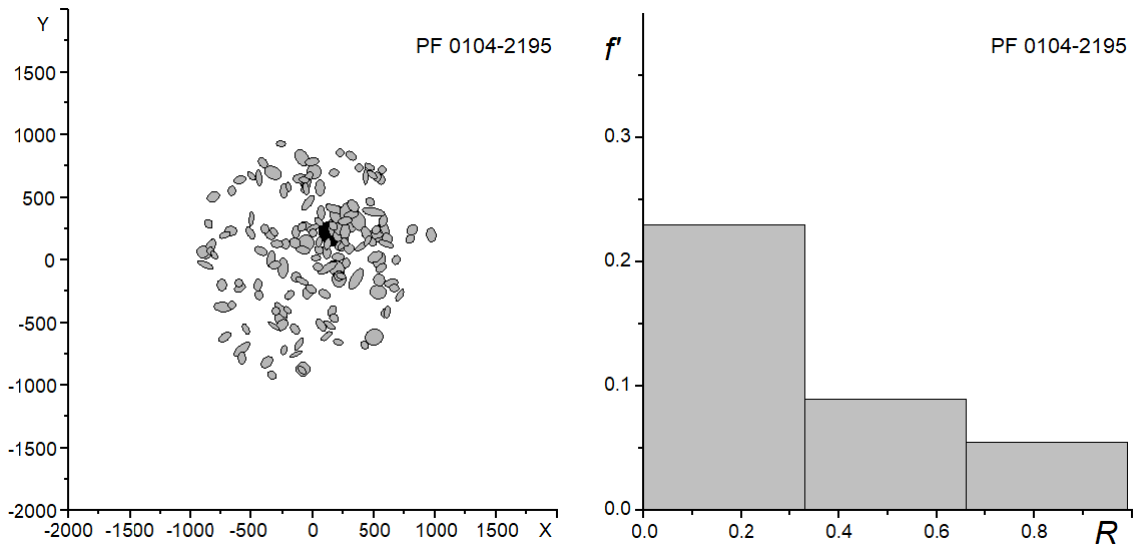


Рис.3. Скупчення І-типу (лівий) і і радіальний розподіл галактик у ньому (правий)

Скупчення О-типу відповідають рівному розподілу галактик у полі скупчення без концентрації до центру (рис.4.).

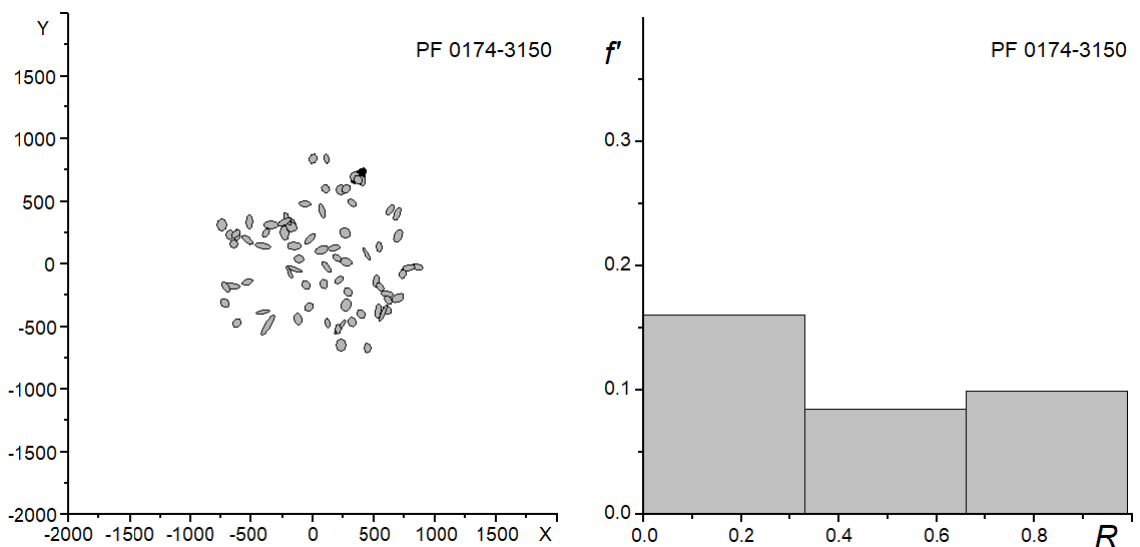


Рис. 4. Скупчення О-типу (лівий) і і радіальний розподіл галактик у ньому (правий)

Концентрація галактик до центру скупчення пов'язана з його еволюцією. Оскільки скупчення галактик – найбільші структури у Всесвіті, час віріалізації яких менший за Габблівський час, можна спостерігати скупчення на різних еволюційних стадіях, що проявляє себе в особливостях їхньої внутрішньої структури. Відповідно, скупчення О-типу відповідають раннім етапам еволюції, І-типу – проміжним і С-типу – пізнім.

Із вибірки 8 скупчень належать до типу С, 70 скупчень – до типу І і 25 скупчень – до типу О. Відповідно, більшість скупчень знаходиться на проміжних стадіях еволюції.

Слід зауважити, що можливо знайти скупчення типу О із лінійною підструктурою (рис. 5). Відповідно, це вказує на те, що лінійні підструктури в скупченнях формуються незалежно та в силу інших фізичних причин (не через тяжіння галактик до центру скупчення).

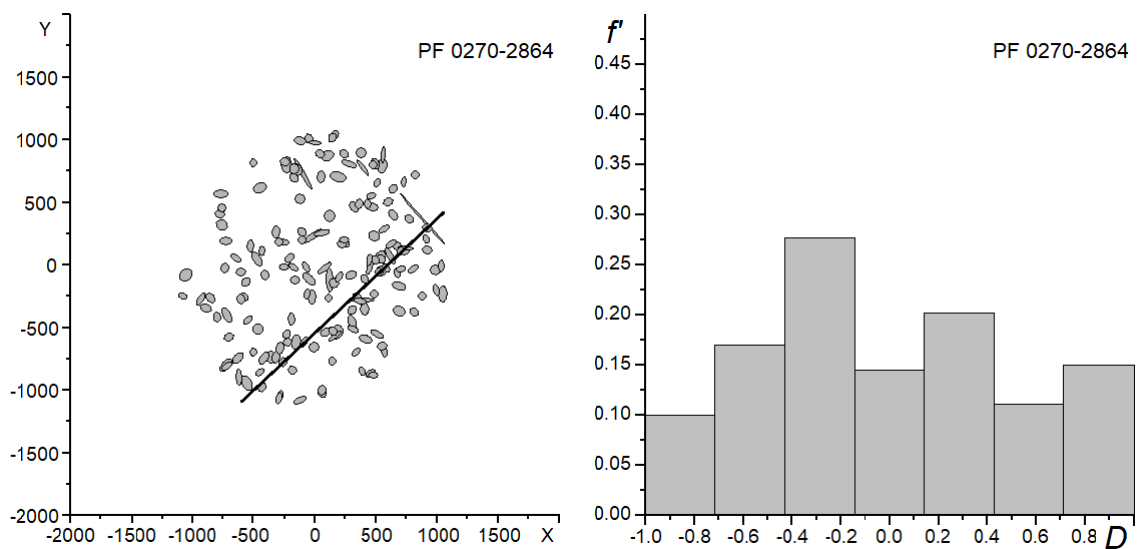


Рис. 5. Скупчення О-типу із лінійною підструктурою (лівий, виділена чорною суцільною лінією) і розподіл галактик у скупченні за смугами (лівий)

3.2. Лінійні підструктури у скупченнях галактик

У скупченнях типу L наявні області підвищеної концентрації галактик вздовж виділеного напрямку – у певній смузі (рис. 5, 6).

У скупченнях і групах галактик не спостерігається обертання навколо однієї визначеної осі. Утворення лінійних підструктур, відповідно, не пов'язано ані з обертанням, ані з тяжінням галактик до центру скупчення. Їх наявність є яскравим маркером розподілу темної матерії в полі скупчення.

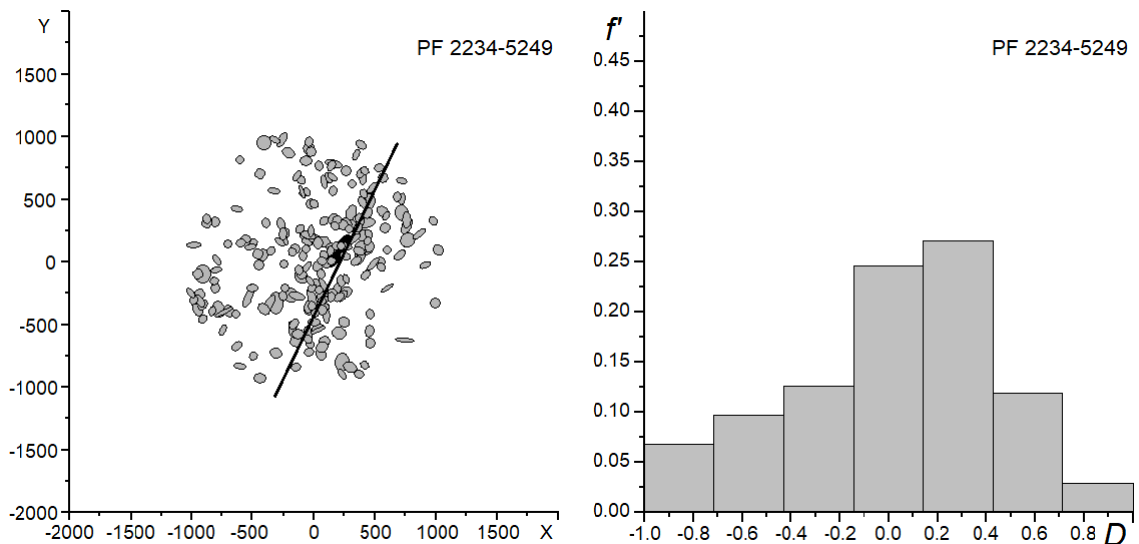


Рис. 6. Скупчення I-типу із лінійною підструктурою L5 (лівий, виділена чорною суцільною лінією) і розподіл галактик у скупченні за смугами (правий)

cD-галактика у PF 2234-5249 на рис. 6 орієнтована вздовж лінійної підструктури. ВСМ у скупченнях L-типу відіграють важливу роль, оскільки варіації обертового моменту галактик пов'язані із фундаментальними обмеженнями, закладеними в моделі формування галактик. Через те, що обертові моменти відомі лише для деяких галактик, натомість вивчають саме орієнтації головних осей або площин галактик у скупченні.

Лінійні підструктури наявні у 38 скупченнях із вибірки, що вказує на їхнє формування в межах великомасштабних структур – філаментів і стін.

3.3. Роль найяскравіших галактик у скупченнях галактик

До типу cD відносять скупчення із cD-галактикою в центрі. Галактики цього типу як правило належать до ВСМ або є найяскравішим об'єктом скупчення. Вони формуються шляхом зіткнення інших великих спіральних галактик у центрі скупчення. Відповідно, їхня наявність також вказує на те, що скупчення знаходиться на пізніх еволюційних стадіях.

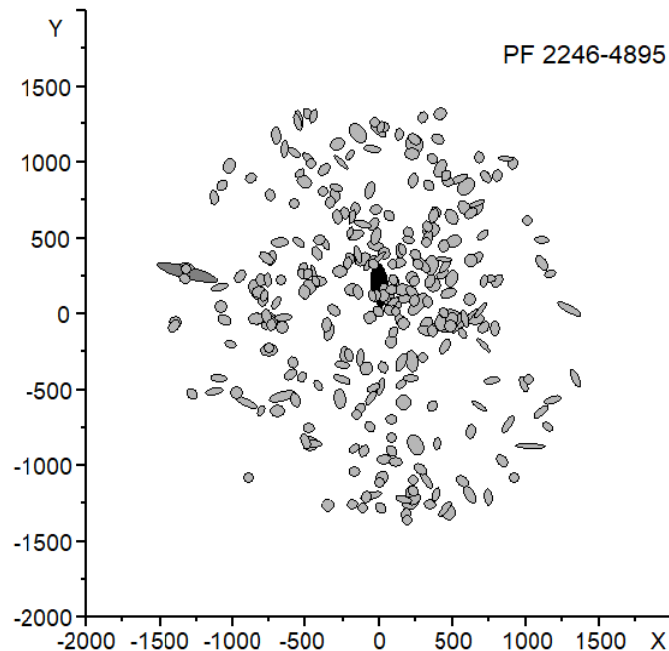


Рис. 7. Скупчення І-типу із сD-галактикою в центрі

У 50 скупченнях у центрі розташовані ВСМ, яскравіші не менш ніж на 1^m за інших членів. Характерно, що тип С за концентрацією галактик і тип сD за роллю ВСМ тісно пов'язані, оскільки відповідають пізнім стадіям еволюції скупчення. Але у вибірці більшу частину сD-скупчень складають скупчення І-типу.

3.4. Регулярні підструктури та особливості

Тип Р відповідає особливостям внутрішньої структури скупчень галактик, які не описуються схемою морфологічної класифікації. Як правило, структурні особливості з'являються внаслідок зовнішніх впливів і взаємодій між скупченнями галактик. Вони носять індивідуальний характер і потребують окремого дослідження.

Але все ж серед особливостей можна виділити такі, які також повторюються – Х- і Y-подібні та викривлені лінійні підструктури (викривлена лінійна підструктура на рис.9).

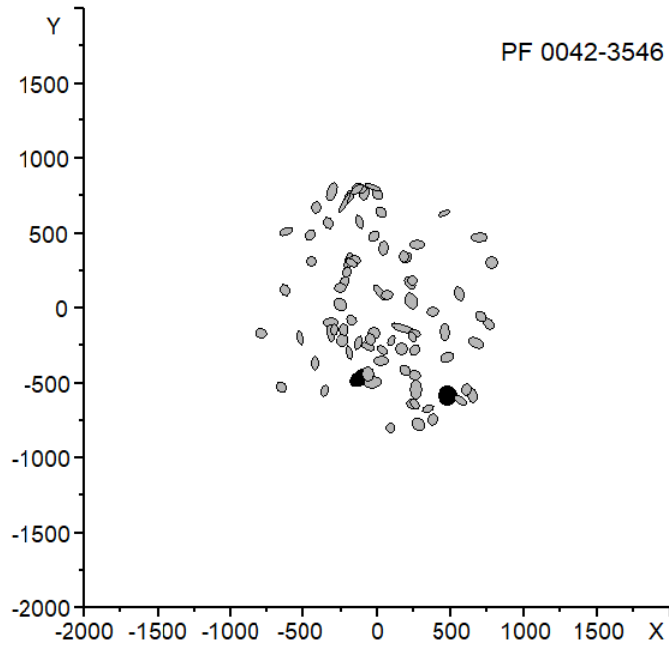


Рис. 8. Скупчення із вигнутою лінією

На рис. 10 скупчення галактик із Y-подібною підструктурою. На діаграмі розподілу густини за центральним кутом прослідковуються три піки, які відповідають лінійним підструктурам «а» (двом відрізкам по різні боки від центра) і «b».

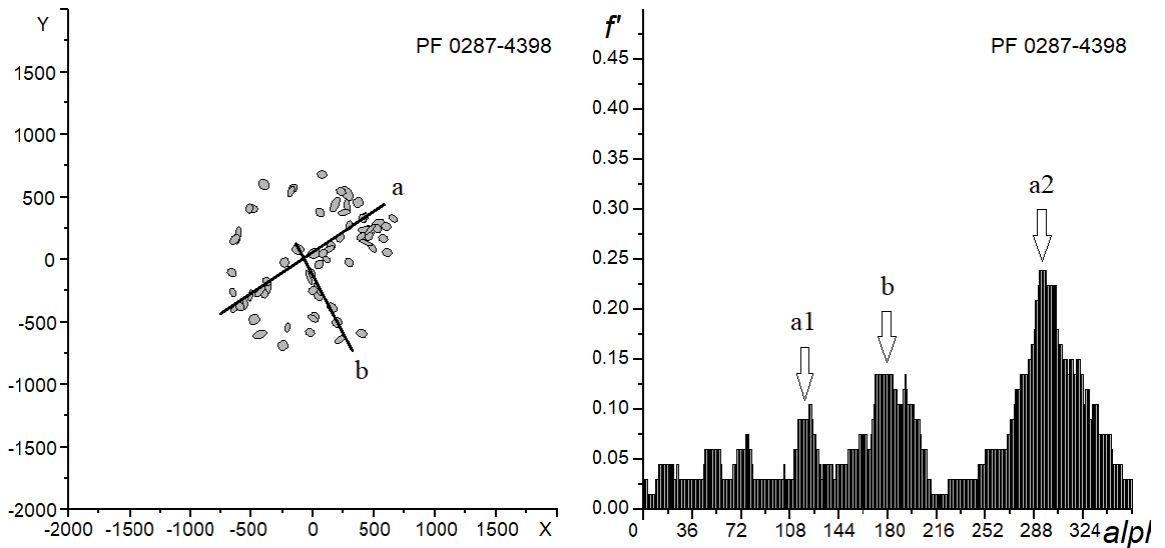


Рис. 9. Скупчення із Y-подібною підструктурою (лівий) і розподіл густини за центральним кутом (правий)

Так само для X-подібних підструктур. На рис. 10 піки діаграми відповідають половинам лінійних складових X. Піки менш виражені через

розсіяння галактик. На перетині лінійних складових знаходиться яскрава галактика (ймовірно cD).

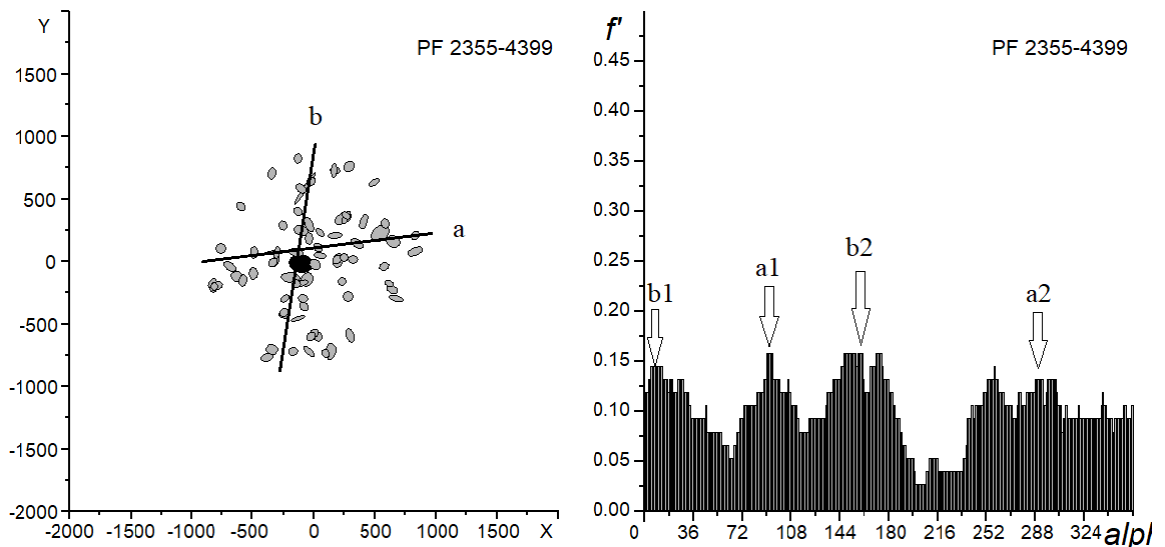


Рис. 10. Скупчення із X-подібною підструктурою (лівий) і розподіл густини за центральним кутом (правий)

Загалом 21 скупчення має особливості, 16 із яких – регулярні підструктури (X- і Y-подібні та вигнуті смуги), які утворюються внаслідок взаємодії між сусідніми скупченнями.

Застосування інструмента морфологічної класифікації для дослідження внутрішньої структури скупчення галактик дозволяє крім безпосереднього встановлення розподілу речовини, що випромінює, визначити еволюційний етап, який проходить скупчення, оцінити розподіл темної матерії в його полі та його належність до великомасштабних структур – філаментів і стін, перевірити моделі формування галактик та дослідити взаємодії всередині скупчення та між сусідніми скупченнями.

В Таблиці 1 представлено зведену таблицю для різних морфологічних типів скупчень галактик.

Загальні результати класифікації подано у додатку.

Таблиця 1

Відповідність між типами С, І, О та іншими

(у дужках поряд і назвами морфологічних типів
указана загальна кількість скупчень цього типу)

	С (8)	І (70)	О (25)
L (38)	2	34	2
cD (50)	8	42	
P (21)	1	18	2

РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

Робота присвячена дослідженню внутрішньої структури скупчень галактик, які належать до надскупчень. Окремий інтерес становлять маркери взаємодії скупчень із сусідами всередині надскупчень та їхній еволюційний статус.

Були отримані наступні результати:

- Проведений якісний і чисельний аналіз внутрішньої структури для 103 скупчень галактик, які належать до 18 надскупчень із насиченням 5 і більше. Досліджено двовимірний розподіл галактик у полі скупчення, роль найяскравіших галактик у скупченні.
- Створено список скупчень галактик, що мають складну структуру – для подальшого дослідження.
- Більшість скупчень (70 зі 103) мають проміжну концентрацію галактик до центру. Відповідно, скупчення знаходяться на проміжних етапах своєї еволюції.
- Всередині одного надскупчення скупчення належать до близьких морфологічних типів. Відповідно, у надскупченнях скупчення галактик проходять еволюцію схожим чином і швидкість еволюції можна вважати однаковою.
- 38 скупчень мають лінійні підструктури. Вони є регулярною особливістю внутрішньої структури скупчення і пов'язані з філаментарною структурою підстилаючої сітки темної матерії.
- Із них 13 скупчень (понад 10%) мають підструктури Х- та Y-типу. Підструктури Х- та Y-типу пов'язані зі взаємодією між скупченнями всередині надскупчення та/або репрезентують складний шлях формування скупчення.
- Загалом 21 скупчення мають структурні особливості, зокрема згадані підструктури, вигнуті лінії та несиметричний розподіл галактик у полі тощо, та потребують детальнішого дослідження.

Із зазначених результатів випливає, що взаємодія між скупченнями галактик всередині надскупчення відіграє важливу роль у формуванні внутрішньої структури та еволюції кожного окремого скупчення. Дослідження цієї структури дозволяє робити висновки щодо розподілу темної матерії, формування Великомасштабної структури Всесвіту загалом і перевіряти узгодженість теоретичних моделей і комп'ютерних моделювань із дійсними спостереженнями.

Результати зазначених досліджень доповідалися на 18-ій Гамовській міжнародній конференції-школі та увійшли до публікацій [28, 37].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. W. Herschel. On the Construction of the Heavens. / W. Herschel // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. — 1785. — Vol. 75. — P. 213–266.
2. W. Herschel. Catalogue of one thousand new nebulae and clusters of stars. / W. Herschel // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. — 1786. — Vol. 76. — P. 457–499.
3. W. Herschel. Catalogue of a second Thousand of new Nebulae and Clusters of Stars; with a few introductory Remarks on the Construction of the Heavens. / W. Herschel // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. — 1789. — Vol. 79. — P. 212–255.
4. W. Herschel. Catalogue of 500 new Nebulae, nebulous Stars, planetary Nebulae, and Clusters of Stars; with Remarks on the Construction of the Heavens. / W. Herschel // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. — 1802. — Vol. 92. — P. 477–528.
5. Herschel, John F. W. A general catalogue of nebulae and clusters of stars, arranged in order of right ascension and reduced to the common epoch 1860. 0 (with precessions computed for the epoch 1880. 0) (1864) / F. W. Herschel, John // London. – Printed by Taylor & Francis. — 1864. — P. 1—137.
6. Stratonoff W. Études sur la structure de l'univers. Partie. II Atlas / W. Stratonoff // Publications de l'observatoire astronomique et physique de Tachkent. — Tachkent, éditeur Kamenski. — 1900. — P. 2—175.
7. Charlier C. V. L. Wie ein Unendliche Well aufgebaut sein kann / C. V. L. Charlier // Arkiv for Matematik Astronomi och. Fysik. — 1908. — Vol. 4. — P. 24.
8. Hubble E. P. Realm of the Nebulae / E. P. Hubble // New Haven, Yale University Press. — 1936. — P. 1—226.
9. Shapley H. Luminosity Distribution and Average Density of Matter in Twenty-five Groups of Galaxies / H. Shapley // Proceedings of the National

- Academy of Sciences of the United States of America. — 1933. — Vol. 19. — P. 591—596.
10. Abell G. O. The Distribution of Rich Clusters of Galaxies / G. O. Abell // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 1958. — Vol. 3. — P. 211—288.
 11. Abell G. O. A Catalog of Rich Clusters of Galaxies / G. O. Abell, H. G. Corwin, R. P. Olowin // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 1989. — Vol. 70. — P. 1—138.
 12. Zwicky F. Catalogue of Galaxies and of Clusters of Galaxies (6 Vols) / F. Zwicky, E. Herzog, P. Wild, et al. // Pasadena, California Institute of Technology. — 1961–1968. — P. 1—43.
 13. Davis M. A survey of galaxy redshifts. II – The large scale space distribution / M. Davis, J. Huchra, D. W. Latham, J. Tonry // The Astrophysical Journal. — 1982. — Vol. 253. — P. 423—445.
 14. Huchra, J. A survey of galaxy redshifts. IV – The data / J. Huchra, M. Davis, D. Latham, J. Tonry // The Astrophysical Journal Supplement Series. — 1983. — Vol. 52. — P. 89—119.
 15. Geller M. J. Mapping the Universe / M. J. Geller, J. P. Huchra // Science. New Series. — 1989. — Vol. 246. — P. 897—903.
 16. Gott J. R. III A Map of the Universe / J. R. III Gott, M. Jurić, D. Schlegel, et al. // The Astrophysical Journal. — 2005. — Vol. 624. — P. 463—484.
 17. Abazajian K. N. The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey / K. N. Abazajian, N. Kevork; J. K. Adelman-McCarthy, et al // The Astrophysical Journal Supplement. — 2009. — Vol. 182. — P. 543—558.
 18. Panko E. Galaxy clusters, their components and evolution. / E. Panko // Proceedings of the Polish Astronomical Society. — 2019. — Vol. 9. — P. 178—188

19. Springel V. The largest N-body simulation of the universe / V. Springel // Max Planck Institute for Astrophysics. — 2004. (https://www.mpa.mpg.de/mpa/research/current_research/hl2004-8/hl2004-8-en.html)
20. Vogelsberger M. Introducing the Illustris Project: Simulating the coevolution of dark and visible matter in the Universe. / M. Vogelsberger, S. Genel, V. Springel, et al // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2014. — Vol. 444. — P. 1518—1547
21. Genel S. Introducing the Illustris Project: the evolution of galaxy populations across cosmic time. / S. Genel, M. Vogelsberger, V. Springel, et al // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2014. — Vol. 445. — P. 175—200
22. Velliscig M. The alignment and shape of dark matter, stellar, and hot gas distributions in the EAGLE and cosmo-OWLS simulations. / M. Velliscig, M. Cacciato, J. Schaye, et al // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 2015. — Vol. 453. — P. 721—738
23. Joachimi B. Galaxy alignments: An overview. / B. Joachimi, M. Cacciato, T. D. Kitching, et al // Space Science Reviews. — 2015. — Vol. 193. — P. 1—65
24. Bautz L. P. On the Classification of the Forms of Clusters of Galaxies / L. P. Bautz, W. W. Morgan // The Astrophysical Journal. — 1970. — Vol. 162. — P. L149—L153.
25. Rood H. J. “Tuning Fork” Classification of Rich Clusters of Galaxies / H. J. Rood, G. N. Sastry // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. — 1971. — Vol. 83. — P. 313—319.
26. López-Cruz O. The Classification of Clusters of Galaxies: Comments on the Proposal of a New Subclass / O. López-Cruz // The Garrison Festschrift: held in Tucson, Arizona, at the Arizona Inn June 10–11, 2002”, eds. by R. O. Gray, C. J. Corbally, and A. G. D. Philip. Schenectady, NY: L. Davis Press. — 2004. — P. 109—22.

27. Panko E. A. The Criteria for Morphological Classification of PF Galaxy Clusters. / E. A. Panko // *Odessa astronomical publications*. — 2013. — Vol. 26. — P. 90—93.
28. Panko E. A. Linear Substructures in Galaxy Clusters. / E. Panko, V. Korshunov, S. Yemelianov, V. Zabolotnii. // *Odessa astronomical publications*. — 2019. — Vol. 32. — P. 33—36.
29. Ungruhe, R. The Muenster Red Sky Survey: Large-scale structures in the Universe. / R. Ungruhe, W.C. Seitter, H.W. Duerbeck. // *Journal of Astronomical Data*. — 2003. — Vol. 9. — P.1—12.
30. E. Panko. A Catalogue of Galaxy Clusters and Groups Based on the Muenster Red Sky Survey. / E. Panko, P. Flin. // *Journal of Astronomical Data*. — 2006. — Vol. 12. — P. 1—9.
31. G. Voronoi. Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie des formes quadratiques. Deuxième mémoire. Recherches sur les paralléloèdres primitifs. / G. Voronoi. // *Journal für die reine und angewandte Mathematik (Crelles Journal)* — 1908. —, Vol. 1908 (Issue 134). — P. 198—287.
32. E. Panko. Application of the Voronoi tessellation technique for galaxy cluster search in the Münster Red Sky Survey. / E. Panko, P. Flin. // *Proceedings of the International Astronomical Union*. — 2004. — Vol. 2004 (IAUC195). — P. 245—247.
33. Huchra J. P. Groups of galaxies. I – Nearby groups / J. P. Huchra, M. J. Geller // *The Astrophysical Journal*. — 1982. — Vol. 257. — P. 423—437.
34. Zeldovich Y. B. Giant voids in the universe / Y. B. Zeldovich, J. Einasto, S. F. Shandarin // *Nature*. — 1982. — Vol. 300. — P. 407—413.
35. E. Panko. Galaxy Superclusters Detected in the Modified PF-Catalog Using the FoF Method. / E. Panko. // *Baltic Astronomy*. — 2011 — Vol. 20. — P. 313—316.

- 36.S. Yemelyanov. The Possibilities of the “Cluster Cartography” Tool for the Study of Inner Structures of Galaxy Clusters. / S. Yemelyanov, E. Panko. // Odessa astronomical publications. — 2021. — Vol. 34. — P. 35—39.
- 37.E. Panko. Substructures in the Galaxy Clusters in Rich Regions. / E. Panko, S. Yemelianov, V. Korshunov, A. Sirginava. // Astronomy Reports. — 2021. — Vol. 65. — P. 1005—1006.

Додаток. Список скупчень галактик, які належать до надскупчень, та їхні морфологічні типи

SCI – номер надскупчення

PF – номер скупчення галактик

C-I-O – тип за концентрацією до центру

L – тип за наявністю лінійних підструктур

BG – тип за роллю BCG

P – тип за пекулярністю

Таблиця 2

SCI	PF	C-I-O	L	BG	P
002-26	0000-2521	C		cD	
	0000-2606	I	L	cD	X
	0014-2512	I	L	cD	Y
	0025-2612	I	L		
	0034-2570	I	L		Y
004-34	0035-3279	I	L		Y
	0041-3402	I	L	cD	P
	0042-3546	I	L	cD	P
	0042-3453	O			
	0052-3330	I			
018-32	0174-3150	O			
	0175-3077	I			
	0177-3215	O			P
	0181-3140	I			
	0182-3235	O			
025-23	0244-2339	C		cD	
	0245-2297	I	L	cD	
	0245-2186	I			
	0249-2225	I	L	cD	
	0252-2286	I		cD	
039-39	0373-3819	I			
	0385-3805	I		cD	
	0385-3857	O			
	0390-3923	I		cD	
	0398-3879	C		cD	

Продовження таблиці 2

SCI	PF	C-I-O	L	BG	P
039-21	0374-1999	C		cD	
	0386-2000	C		cD	
	0386-2225	I	L		Y
	0395-2098	I	L		P
	0397-2244	O			
000-39	0000-3946	I		cD	
	0002-3905	I	L		
	0003-3866	O			
	0004-4092	I	L		
	2384-3893	I		cD	
213-23	2127-2366	O			
	2136-2322	C	L	cD	
	2136-2277	I	L		X
	2139-2330	I	L	cD	
227-38	2256-3650	I			
	2256-3954	O			
	2265-3784	I	L		
	2272-3759	O			
	2274-3986	I	L	cD	Y
232-44	2307-4371	O			
	2320-4385	I		cD	
	2337-4249	I			
	2355-4399	I	L	cD	Y
003-50	0011-5216	I		cD	
	0017-5149	I	L	cD	
	0023-4937	O			
	0028-4990	I		cD	
	0044-4831	O			
	0045-5021	I		cD	
008-22	0065-2230	I	L	cD	P
	0070-2177	I		cD	
	0072-2227	I			
	0083-2152	I	L	cD	
	0089-2178	I	L	cD	
	0104-2195	I		cD	

Продовження таблиці 2

SCI	PF	C-I-O	L	BG	P
026-28	0245-2639	I			
	0258-2978	I			
	0258-2731	I	L		Y
	0270-2864	O	L		
	0272-2686	O	L		Y
	0274-2890	I	L		
033-55	0320-5316	I	L	cD	P
	0327-5561	I		cD	
	0332-5592	I		cD	
	0334-5470	I	L		X
	0335-5618	I		cD	
	0358-5470	O			
028-45	0261-4539	I			
	0272-4549	O			
	0281-4525	O			
	0287-4398	I	L		
	0288-4542	I		cD	
	0298-4450	I			
	0301-4436	I			
003-52	0000-5218	O			
	0009-5163	O			
	0020-5096	I	L		X
	0032-5356	C	L	cD	
	0040-4964	I		cD	
	0044-5168	I	L	cD	
	0046-5423	I		cD	
	0052-5284	O			
224-49	2206-5010	O			
	2217-5177	I		cD	
	2234-5249	I	L	cD	
	2239-4999	I		cD	
	2246-4895	I	L	cD	Y
	2256-4734	O			
	2268-4580	O			

Продовження таблиці 2

SCI	PF	C-I-O	L	BG	P
041-64	0395-6285	I	L	cD	P Y
	0397-6171	C		cD	
	0407-6535	I		cD	
	0408-6199	O	L		
	0408-6628	I		cD	
	0418-6274	I		cD	
	0418-6383	I		cD	
	0427-6486	I		cD	
	0427-6347	I			