

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ І. І. МЕЧНИКОВА

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

ЄМЕЛЬЯНОВ СВЯТОСЛАВ ІГОРОВИЧ

УДК 524.77, 524.7-8, 51-7

ДИСЕРТАЦІЯ

**ДЕТАЛЬНА МОРФОЛОГІЯ СКУПЧЕНЬ ГАЛАКТИК**

10 – Природничі науки

104 - Фізика та астрономія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень.  
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів  
мають посилання на відповідне джерело

\_\_\_\_\_ С. І. Ємельянов

Науковий керівник: Панько Олена Олексіївна,  
доктор фізико-математичних наук, професор

Одеса - 2023

## АНОТАЦІЯ

**Смельянов С. І. Детальна морфологія скупчень галактик.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії 104 – фізика та астрономія. Одеський національний університет імені І. І. Мечникова МОН України, Одеса, 2023.

Дисертаційна робота присвячена детальному дослідженню внутрішньої структури скупчень галактик, включаючи їхню морфологію, підструктури та вирівнювання галактик відносно оточення у двовимірному випадку. Дослідження базується на статистичному аналізі та використанні спеціально розробленого здобувачем під час виконання дисертаційного дослідження програмного забезпечення для аналізу розподілу галактик у скупченнях. Основні цілі включають в себе виявлення областей підвищеної щільності у скупченнях, класифікацію скупчень галактик за їхньою морфологією згідно з формою та розташуванням цих областей. Також ціллю дослідження був аналіз орієнтацій зображень галактик у скупченнях відносно знайдених підструктурах та/або всього скупчення.

Сучасні уявлення про еволюцію Всесвіту, зокрема утворення його великомасштабної структури, ґрунтуються на теоретичних дослідженнях, комп'ютерних багаточастинкових симуляціях та порівнянні результатів із розподілом речовини, що спостерігається. Особливості скупчень галактик, що спостерігаються, є одним з основних напрямів фундаментальних досліджень в галузі спостережної космології. Великі астрофізичні огляди неба, починаючи з POSS (Огляд неба Паломарської обсерваторії), містять інформацію про мільйони галактик. На основі цих оглядів були створені каталоги скупчень та надскупчень галактик. Скупчення галактик є значущими елементами великомасштабної структури Всесвіту, та, водночас, найбільшими вірталізованими системами у доступному для спостереження Всесвіті.

Спостережною базою дисертаційного дослідження є «Каталог скупчень та груп галактик», який було створено Панько та Фліном на базі списку галактик Мюнстерського червоного огляду неба (Muenster Red Sky Survey, MRSS), автори Унгруе та ін. В свою чергу, список галактик є одним з результатів оцифровки та ретельного аналізу 217 астронегативів Європейської південної обсерваторії, які охоплюють приблизно 5 тисяч квадратних градусів південного неба з галактичною широтою  $b < -45^\circ$ .

Дисертаційне дослідження виконувалося відповідно до плану науково-дослідних робіт Одеського національного університет імені І.І. Мечникова в межах кафедральної тематики (без цільового фінансування), науково-дослідна тема № 303 «Морфологія та динаміка багатокomпонентних космічних систем», наказ ОНУ імені І.І. Мечникова №1730-18 від 22.09.20, номер державної реєстрації 0120U104575.

**Метою дисертаційної роботи є:** детальний аналіз двовимірного розподілу галактик у полі скупчення з використанням спеціально створеного математичного забезпечення; пошук окремих внутрішніх деталей різної форми (еліптичних, філаментарних, хрестоподібних, тощо) статистичними методами; оцінка ролі найяскравіших галактик у підструктурах; отримання даних щодо спостережних особливостей орієнтацій галактик у скупченнях та у підструктурах; оцінка еволюційного статусу скупчення за його морфологічними особливостями.

**Методи дослідження.** Основний метод дослідження є статистичний аналіз, який дозволяє визначати на статистично значущому рівні наявність різного роду підструктур у скупченнях галактик. Для цього здобувачем було створено математичне забезпечення у середовищі C++ Builder: пакет програм "Cluster Cartography" (CC), який дозволяє будувати двовимірні карти скупчення у тангенціальних координатах та проводили подальший аналіз розподілу галактик. Також було використано порівняння орієнтацій знайдених підструктур з орієнтаціями галактик у них та/або с напрямками на найближчого сусіда статистичними методами.

**Наукова новизна отриманих результатів.** В результаті дослідження вперше використано чисельні критерії для статистично значущого виділення підструктур у скупченнях галактик. Ця інноваційна методика дозволила отримати об'єктивні результати та визначити морфологічні типи для 460 скупчень галактик. З них 247 входять до каталогу галактик АСО і були класифіковані відповідно до концентрації до центру та положення найяскравішої галактики. Вдосконалено схему морфологічної класифікації скупчень з врахуванням статистично обґрунтованих результатів, що зробило класифікацію більш точною та надійною.

Досліджено особливості морфології скупчень галактик у багатих регіонах та ізольованих, що розширило розуміння взаємодії між сусідніми скупченнями та околицями. Виявлено, що складні підструктури, такі як хрести, пів-хрести, компактні та викривлені ланцюжки, є регулярними підструктурами, і їхнє існування обумовлено загальними закономірностями у формуванні великомасштабних утворень.

На якісному спостережному матеріалі було підтверджено зв'язок орієнтацій галактик у підструктурах з напрямом самої підструктури та її типом, що допомагає краще розуміти внутрішню структуру скупчень. Дослідження також підтвердило особливу роль найяскравіших та наймасивніших галактик у скупченнях, а також вирівнювання скупчень галактик та/або напрям підструктури відповідно до напрямку на найближчого сусіда.

Отримані результати є важливим внеском у розуміння структури скупчень галактик та процесів, які призводять до формування різних морфологічних типів скупчень у Всесвіті. Дані дослідження мають важливе значення для астрономічних досліджень та можуть бути використані для подальших досліджень у галузі астрофізики та космології.

**Для досягнення мети** дослідження було розроблено та реалізовано у програмному коді алгоритми, які дозволили аналізувати двовимірний розподіл галактик у полі скупчення та визначити їхні морфологічні

особливості на основі статистичних критеріїв. З використанням пакету SS було проведено детальний аналіз розподілу галактик для 460 скупчень, які містять 100 або більше галактик у полі скупчення, а також для 112 скупчень, які розташовані в багатих регіонах, та 31 ізольованого скупчення з каталогу PF.

Результати дослідження не лише відкривають нові аспекти структури скупчень галактик, але також підтверджують попередні припущення щодо регулярності підструктур та важливості найяскравіших галактик у скупченнях. Враховуючи важливу роль скупчень галактик як ключових об'єктів у вивченні космології та астрофізики, отримані результати мають значущий імпакт на ці галузі науки.

**Практичне значення отриманих результатів.** Результати, що було отримано під час виконання дисертаційного дослідження, дозволяють деталізувати сценарії формування скупчень галактик. Їх буде використано фахівцями, які працюють в галузі позагалактичної астрономії та космології, як спостережні тести для перевірки коректності теоретичних сценаріїв та результатів багаточастинкових симуляцій, а також для подальшого вивчення особливостей внутрішньої будови скупчень галактик як в Україні, так й за її межами, зокрема в Польщі (“Statistics in ExtraGalactic Astronomy and Astrophysics Group”, Institute of Physics, Opole University, Poland, <http://fizyka.wmfi.uni.opole.pl/grupa-badawcza-segaag/>).

Методика аналізу та математичне забезпечення — пакет програм Cluster Cartography — дозволяє проводити статистично обґрунтований пошук підструктур для двовимірного розподілу галактик у полі скупчення на базі будь-якого каталогу скупчень галактик, який має перелік галактик, що утворюють скупчення.

Поширені останнім часом численні проекти по використанню нейронних мереж для аналізу морфологічних особливостей об'єктів позагалактичної астрономії вимагає добре проаналізованого набору даних

для тренування штучного інтелекту. Такий набір було створено під час виконання дисертаційного дослідження.

Крім того, отримані дані використовуються в ОНУ імені І.І. Мечникова у навчальному процесі в курсі ВБ 4.01 «Позагалактична астрономія» (ОП 104 «Фізика та астрономія» другого (магістерського) рівня вищої освіти). Пакет СС, створений під час дисертаційного дослідження, використовується під час підготовки бакалаврських та магістерських робіт за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія.

**Ключові слова:** Космологія: великомасштабні структури Всесвіту, позагалактична астрономія, скупчення галактик: морфологія, скупчення галактик: еволюція, галактики, галактики: орієнтація, астрофізика, аналіз даних, статистика, математичне забезпечення.

## ANNOTATION

**Yemelyanov S. I. Detailed Morphology of Galaxy Clusters.** – Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Physics and Astronomy. Odessa National I. I. Mechnikov University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2023.

The inner structure of galaxy clusters, including their morphology, regular substructures and different types of features, and orientations of galaxies according to the parent structures are studied in the present work. The study is based on statistical analysis with the use of specially prepared software. The software was developed by the author of the present Thesis, especially for analyzing the 2D distribution of galaxies in clusters. The main goals include the detection of regions of increased density in galaxy clusters, and the morphological classification of clusters according to the shapes and locations of these regions. The goal of the

study was also to analyze the orientations of images of galaxies in clusters according to detected substructures as well as parent clusters.

Modern ideas about the evolution of the Universe, in particular the formation of its Large-Scale Structure, are based on theoretical studies, super-computer multi-particle simulations, and comparison of the results with the observed distribution of matter. Large astrophysical sky surveys, starting with POSS (Palomar Observatory Sky Survey), contain information about millions of galaxies. A lot of catalogs of galaxy clusters and superclusters are based on these surveys. Clusters of galaxies are significant elements of the large-scale structure of the Universe, and, at the same time, they are the largest virialized systems in the observable Universe.

The observational base of the Thesis is the “Catalogue of Clusters and Groups of Galaxies”, created by Panko and Flin. This Catalogue is based on the list of galaxies of the Muenster Red Sky Survey (MRSS, authors Ungrue et al.), which is one of the results of the careful analysis of 217 digitized astronegatives of the European Southern Observatory, which covers approximately 5 thousand square degrees of the southern sky with a galactic latitude  $b < -45^\circ$ .

The research was carried out according to the planned research works of Odesa I.I. Mechnikov National University, research topic No. 303 “Morphology and dynamics of multicomponent space systems”, state registration number 0120U104575.

**The aim of the study** is detailed analysis of the two-dimensional distribution of galaxies in the cluster field using specially created software; search for individual internal features of different shapes (elliptical, filamentary, cross-shaped, etc.) by statistical methods; assessment of the role of the brightest galaxies in substructures; obtaining data on the observed features of orientations of galaxies in clusters and detected substructures; evaluating of the evolutionary status of the cluster based on its morphological features.

**Research Methods.** The main research method is statistical analysis, which allows detection of the presence of various substructures in galaxy clusters at a

statistically significant level. To realize this goal, the author of the Thesis created a special tool in the C++ Builder environment: the "Cluster Cartography" (CC) program package. CC tool allows you to build two-dimensional cluster maps in tangential rectangular coordinates and execute further statistical analysis of the 2D distribution of galaxies in the cluster field. A comparison of the orientations of the detected substructures with the orientations of the galaxies in them and/or with the directions to the nearest neighbor using statistical methods was also used.

**Scientific novelty of the obtained results.** In the present study for the first time, the numerical criteria for the statistically significant detection of substructures in galaxy clusters were used. This innovative technique made it possible to obtain objective results and determine morphological types for 460 galaxy clusters. Of these, 247 have analogs in the ACO galaxy catalog and corresponded classification according to their concentration to the cluster center and the role and position of the brightest galaxy, but the detailed classification of these clusters was made for the first time in the present study. Other clusters were classified for the first time. The scheme of morphological classification of clusters was improved, taking into account statistically justified results, which made the classification more accurate and reliable.

Also for the first time, the peculiarities of the morphology of galaxy clusters in rich regions and isolated ones were studied. The results expanded the understanding of the interaction between neighboring clusters and/or their surroundings. Complex substructures, such as crosses, half-crosses, and compact and curved chains, were found to be rare, but regular substructures, and their existence is due to general patterns in the formation of large-scale structures.

The qualitative observational material allowed to confirm the correlation between the orientation of galaxies belonging to the substructure and the direction of the substructure itself, as well as its type. This correlation leads to a better understanding of the internal structure of clusters. The present study also confirmed the special role of the brightest and most massive galaxies in clusters, as



well as the significant alignment of galaxy clusters and/or substructure directions with the direction of the nearest neighbor.

The results obtained in the present study are an important contribution to the understanding of the structure of galaxy clusters and the processes that lead to the formation of different morphological types of clusters in the Universe. These researches are important for the next study of Large Scale Structure of the Universe evolution and can be used for further research in the field of astrophysics and cosmology.

**To achieve the research goal**, the author of the Thesis developed and implemented algorithms in the program code (in the C++ Builder environment) that allowed analyzing the two-dimensional distribution of galaxies in the cluster field and determining their morphological features based on statistical criteria. Using the CC package, a detailed analysis of the galaxy distribution was performed for 460 clusters that contain 100 or more galaxies in the cluster field, as well as for 112 clusters that are located in rich regions and 31 isolated clusters from the Panko & Flin "Catalogue of Clusters and Groups of Galaxies".

The results of the present study not only reveal new aspects of the structure of galaxy clusters but also confirm previous assumptions about the regularity of substructures and the importance of the brightest galaxies in clusters. Given the important role of galaxy clusters as key objects in the study of cosmology and astrophysics, the obtained results have a significant impact on these fields of science.

**The practical significance of the obtained results.** The results, which were obtained during the dissertation research, make it possible to detail the scenarios of the formation of galaxy clusters. They will be used by specialists working in the field of extragalactic astronomy and cosmology as observational tests to check the correctness of theoretical scenarios and results of multi-particle simulations, as well as to further study the peculiarities of the internal structure of galaxy clusters both in Ukraine and abroad, in particular in Poland ("Statistics in ExtraGalactic

Astronomy and Astrophysics Group", Institute of Physics, Opole University, Poland,

<http://fizyka.wmfi.uni.opole.pl/grupa-badawcza-segaag/>).

The analysis technique and mathematical support — the Cluster Cartography program package — allows for a statistically justified search for substructures for the two-dimensional distribution of galaxies in the cluster field based on any catalog of galaxy clusters that has a corresponding list of galaxies forming clusters.

Recent projects using neural networks to analyze morphological features of extragalactic astronomy objects require a well-analyzed dataset for artificial intelligence training. Such a dataset was created during the dissertation research.

**Keywords:** Cosmology: Large-scale structures of the Universe, extragalactic astronomy, clusters of galaxies: morphology, clusters of galaxies: evolution, galaxies, galaxies: orientation, astrophysics, data analysis, statistics, mathematical tools.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

**Статті у фахових виданнях (список Б), в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:**

- A1. Panko, E. A.; Emelyanov, S. I., THE DETERMINATION OF THE MORPHOLOGICAL TYPES OF GALAXY CLUSTERS USING CLUSTER CARTOGRAPHY, OAP, vol. 28:2, 135 – 136 (2015), DOI: <https://doi.org/10.18524/1810-4215.2015.28.70605>;
- A2. Panko, E. A.; Emelyanov, S. I., THE PECULIARITIES IN O-TYPE GALAXY CLUSTERS, OAP, vol. 30, 121 – 123 (2017), DOI: <https://doi.org/10.18524/1810-4215.2017.30.114369>;
- A3. Panko, E.; Korshunov, V.; Yemelianov, S.; Zabolotnii, V., LINEAR SUBSTRUCTURES IN GALAXY CLUSTERS, OAP, vol. 32, 33 – 36 (2019), DOI: <https://doi.org/10.18524/1810-4215.2019.32.182519>;
- A4. S. Yemelyanov, E.A. Panko, THE POSSIBILITIES OF THE “CLUSTER CARTOGRAPHY” TOOL FOR THE STUDY OF THE INNER STRUCTURES OF GALAXY CLUSTERS, OAP, vol. 34, 35 –39 (2021), DOI: <https://doi.org/10.18524/1810-4215.2021.34.244254>.

**Матеріали та тези конференцій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:**

- A5. Panko E., Emelyanov S. The Determination of the Morphological Types of Galaxy Clusters Using Cluster Cartography. 5-th Gamow International Conference in Odessa "Astrophysics and Cosmology after Gamow: Progress

- and Perspectives" and 15-th Gamow Summer School "Astronomy and Beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicrophysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology" Program and Abstracts, Odessa. — 2015. — P. 37.
- A6. *Панько Е., Емельянов С.* Визуализация скоплений галактик для определения морфологических типов Міжнародна науково-практична конференція проблеми механіки та фізико-хімії конденсованого стану речовини. ТЕЗИ ДОПОВІДЕЙ.— Миколаїв. — 2015. — С.111.
- A7. *Панько Е.А., Емельянов С.И.* Особенности морфологии изолированных скоплений галактик. 16 українська конференція з космічних досліджень. — Одеса. — 2016. — С. 88.
- A8. *Панько Е., Емельянов С.* «Cluster Cartography»: Детальный анализ морфологических особенностей скоплений галактик. 16-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School "Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radio-astronomy and Astrobiology". Abstracts. Odessa. — 2016. — P. 9
- A9. *V. Korshunov, S .Yemelyanov, E. Panko* MORPHOLOGY OF GALAXY CLUSTERS IN SUPERCLUSTERS. 18-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School "Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radio-astronomy and Astrobiology" (Ukraine, Odessa, Chernomorka, August 12-18, 2018). Одесса. — 2018. — P.11
- A10. *Panko E., Yemelianov S., Stepaniuk A.* DETAIL MORPHOLOGY OF THE RICH CONCENTRATED GALAXY CLUSTERS 18-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School "Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radio-astronomy and Astrobiology" (Ukraine, Odessa, Chernomorka, August 12-18, 2018). — Одесса. — 2018. — P.13
- A11. *V.Zabolotnii, S.Yemelianov, V.Korshunov, E.Panko.* DETAIL MORPHOLOGY OF THE RICH GALAXY CLUSTERS WITH INTERMEDIATE

CONCENTRATION. 18-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radio-astronomy and Astrobiology” (Ukraine, Odessa, Chernomorka, August 12-18, 2018) . — Одесса. — 2018. — P.17.

- A12. *V. Zabolotnii, E. Panko, V. Korshunov, S. Yemelianov*. Morphology Subtypes in Rich Galaxy Cluster with Intermediate Concentration. «New Trends in Astrophysics, Cosmology and HEP After Gamow». 6-th Gamow International Conference in Odessa. Abstracts. Odessa . —2019. — P.15.
- A13. *Zabolotnii, V., Panko, E., Korshunov, V., Yemelianov, S.* Regular substructures in rich galaxy clusters with intermediate concentration. International meeting on variable stars research KOLOS 2019/Book of abstracts. Kolonica. – 2019. P.11.
- A14. *E. Panko, S.Yemelianov*. Nearby Galaxy Clusters: Evolutionary Changes. 21-th Gamow International Astronomical Conference-School "ASTRONOMY AND BEYOND: ASTROPHYSICS, COSMOLOGY AND GRAVITATION, HIGH ENERGY PHYSICS, ASTROPARTICLE PHYSICS, RADIOASTRONOMY AND ASTROBIOLOGY". August 15-21, 2021, Abstracts. Odessa, Ukraine. — 2021. — P. 7.
- A15. *S.I. Yemelianov*. Classification of Galaxy Clusters. Realization of the Algorithms of Classifications and Capabilities of the Cluster Cartography Set. Міжнародна конференція “Актуальні питання наземної спостережної астрономії” (MAO-200). 27-30 вересня 2021 р., Миколаїв, Україна. Abstracts. P. 43
- A16. *Pysarevskyi Z., Panko E.A., Yemelianov S.* THE INVESTIGATION OF THE SUBSTRUCTURES IN THE ISOLATED GALAXY CLUSTERS. 22-nd Gamow International Astronomical Conference “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology” (August 22-26, 2022, Odesa, Ukraine). Abstracts. Odessa. 2022. P. 6-7.

A17. Yemelianov S. Capabilities of the cluster cartography set for galaxy cluster substructures detection. 1st Student Scientific Conference of Joint Research Cooperation between Odesa I.I. Mechnikov National University and Huaiyin Institute of Technology, April 28-29, May 16 2022. Conference Proceedings. 2022. P.118.

**Статті в інших виданнях, які додатково відображають наукові  
результати дисертації:**

A18. *Panko, E. A.; Andrievsky, S. M.; Yemelianov, S. I.; Stepaniuk, A. M.* Regular Substructures in the Rich Open Galaxy Clusters, *Astronomy Reports*, 2018, Vol. 62, с. 911–916. <https://doi.org/10.1134/S1063772918120260><sup>1</sup>

A19. *Panko, E.A., Yemelianov, S.I., Korshunov, V.M., Sirginava, A.R.* Substructures in the Galaxy Clusters in Rich Regions. *Astronomy Reports*. 2021, 65(10), с. 1002–1006. <https://doi.org/10.1134/s1063772921100255><sup>1</sup>

A20. *Panko, E. A.; Yemelianov, S.; Sirginava, A.; Pysarevskyi, Z.*, SUBSTRUCTURES IN THE ISOLATED GALAXY CLUSTERS, *Communications of BAO*, Vol. 69, Issue 2, P. 256–264 (2022). <https://doi.org/10.52526/25792776-22.69.2-256>

---

<sup>1</sup> **Scopus, Q3.**

**Publisher:** Pleiades Publishing Ltd, Pleiades House, 7, West 54 Street, New York, NY 10019, web-site: <https://www.pleiades.online>

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....</b>	<b>17</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>18</b>
<b>РОЗДІЛ I. СКУПЧЕННЯ ГАЛАКТИК</b>	
<b>ТА ЇХНЯ МОРФОЛОГІЯ.....</b>	<b>27</b>
1.1. Скупчення галактик, властивості та основні компоненти.....	27
1.2. Схеми морфологічної класифікації галактик.....	31
1.2.1. Морфологія скупчень за розподілом та властивостями галактик.....	31
1.2.2. Вдосконалена схема морфологічної класифікації галактик.....	34
1.2.3. Морфологія скупчень у рентгенівському діапазоні.....	37
1.3. Морфологічні типи скупчень галактик як еволюційні стадії.....	39
1.4. Орієнтації галактик та скупчень галактик.....	41
<b>РОЗДІЛ II. СПОСТЕРЕЖНИЙ МАТЕРІАЛ</b>	
<b>ТА МЕТОДИКА ЙОГО АНАЛІЗУ.....</b>	<b>43</b>
2.1. Мюнстерський червоний огляд неба як база для пошуку скупчень галактик.....	43
2.2. Каталог скупчень галактик Панько та Фліна.....	45
2.3 Алгоритм автоматичного вивчення особливостей розподілу галактик у полі скупчення.....	48
2.4. Пакет Cluster Cartography та його використання.....	50
2.4.1. Підготовка даних та візуалізація скупчення.....	50
2.4.2. Основні команди та візуальна оцінка особливостей розташування галактик у полі скупчення.....	56
2.4.3. Визначення морфологічного типу скупчення за ступенем концентрації до центру скупчення.....	58

	16
2.4.4. Детектування лінійної підструктури у скупченні.....	61
2.4.5. Пошук Y-подібних структур та режим LightHouse Beam.....	64
2.4.6. Аналіз еліптичностей галактик.....	66
2.5. Основні результати за розділом II.....	67
<b>РОЗДІЛ III. МОРФОЛОГІЯ СКУПЧЕНЬ ГАЛАКТИК</b>	
<b>КАТАЛОГУ RF.....</b>	<b>72</b>
3.1. Морфологія скупчень, що не мають значущої концентрації до центру.....	72
3.2. Морфологія скупчень проміжної концентрації до центру.....	77
3.3. Морфологія концентрованих скупчень.....	79
3.4. Скупчення галактик у багатих областях.....	81
3.5. Ізольовані скупчення галактик.....	84
3.6. Особливості концентрації до центру кожного з наборів даних.....	89
3.7. Основні результати за розділом III.....	90
<b>РОЗДІЛ IV. РЕГУЛЯРНІ ПІДСТРУКТУРИ СКЛАДНОЇ ФОРМИ У</b>	
<b>СКУПЧЕННЯХ ГАЛАКТИК КАТАЛОГУ RF.....</b>	<b>93</b>
4.1. Філаментарні підструктури та щільні смуги.....	93
4.2. Викривлені та щільні ланцюжки. Особливості орієнтацій.....	98
4.3. Основні результати за розділом IV.....	102
<b>ВИСНОВКИ.....</b>	<b>104</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>106</b>



## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

AC - Abell Catalogue, каталог скупчень галактик Ейбелла

ACO - Abell, Corwin, Olowin Catalogue, продовження каталогу AC на південну півкулю

BM - Bautz & Morgan Classification, класична схема класифікації скупчень галактик Баутца та Моргана

CC - Cluster Curtographi, розроблена здобувачем програма для двовимірної візуалізації та аналізу розподілу і властивостей галактик, що розташовані у скупченні

DM - Dark Matter, темна матерія

$h^{-1}$  - безрозмірний множник, що враховує невизначеність вимірюного різними методами значення сталої Габбла-Леметра

LHB - LightHouse Beam, промінь маяку, метод аналізу пекулярних скупчень, запропонований автором дисертації

LSS - Large Scale Structure, великомасштабні структури

Mpc - Megaparsec, мегапарсеки

MRSS - Muenster Red Sky Survey, Мюнстерське червоний огляд неба, спостережний базис дослідження

PF - Panko & Flin, каталог скупчень та груп галактик Панько та Фліна, спостережний базис дослідження

RS - Rood & Sastry Classification, класична схема класифікації скупчень галактик Руда та Састрі

## ВСТУП

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Сучасні уявлення про такий аспект еволюції Всесвіту, як утворення його великомасштабної структури, ґрунтуються на теоретичних дослідженнях, комп'ютерних багаточастинкових симуляціях та порівнянні результатів із розподілом речовини, що спостерігається. Великі огляди неба, починаючи з POSS (Palomar Observatory Sky Survey), містять інформацію про мільйони галактик. На основі цих оглядів були створені каталоги скупчень та надскупчень галактик. Скупчення галактик є найбільшими віріалізованими системами у доступному для спостереження Всесвіті. Основним джерелом випромінювання скупчень у оптичному діапазоні є інтегроване світло зір, що випромінюють галактики. У рентгенівському діапазоні випромінювання виникає у гарячому внутрішньокластерному газі, температура якого сягає  $10^7 - 10^8$  К з типовою щільністю частинок  $10^{-1} - 10^{-4}$  см<sup>-3</sup>. Ця повністю іонізована плазма не пов'язана з галактиками-членами скупчення, але створює внутрішньокластерне середовище (intra-cluster medium, ICM). Основна маса скупчення припадає на темну матерію. Будучи найщільнішими регіонами у Всесвіті, скупчення галактик є ідеальними астрофізичними лабораторіями для вивчення взаємодій галактик між собою та з ICM.

Особливості скупчень галактик, що спостерігаються, є одним з основних напрямів фундаментальних досліджень в галузі спостережної космології. З самого початку вивчення скупчень було побудовано різні схеми якісної морфологічної класифікації. Проте, сучасний стан досліджень вимагає більш ретельного вивчення внутрішньої будови скупчень галактик, виділення підструктур скупчень об'єктивними статистично обґрунтованими методами.

Поширені останнім часом проекти щодо використання штучного інтелекту та нейронних мереж для вивчення морфології галактик та більших за масштабом структур також вимагають наявності чітких статистично значущих критеріїв для створення «тренувальних» наборів та спрощення алгоритмів аналізу. Розвинутий у дисертаційному дослідженні підхід надає широкі можливості для використання сучасних технологій в масовому визначенні морфологічних типів скупчень галактик.

**Предмет та об'єкт дослідження.** Предметом даного дослідження є один з елементів великомасштабної структури Всесвіту LSS, а саме, скупчення галактик, об'єктом дослідження обрано внутрішню будову скупчень галактик, наявність підструктур у скупченнях, а також, особливості орієнтацій галактик у скупченнях.

**Метою дослідження є:**

- детальний аналіз двовимірного розподілу галактик у полі скупчення з використанням спеціально створеного математичного забезпечення;
- пошук окремих внутрішніх деталей скупчень галактик різної форми (компактних сгущень різної форми, філаментарних та/або хрестоподібних утворень, тощо) статистичними методами;
- оцінка ролі найяскравіших галактик у підструктурах;
- отримання зі спостережного матеріалу та аналіз даних щодо спостережних особливостей орієнтацій галактик у скупченнях та у підструктурах;
- оцінка еволюційного статусу скупчення за його морфологічними особливостями.

**Для досягнення мети дослідження було виконано наступні завдання:**

- розроблено алгоритми, що дозволяють виконувати аналіз двовимірного розподілу галактик у полі скупчення та визначати його морфологічні особливості, спираючись на статистичні критерії;
- у середовищі C++ Builder створено пакет програм «Cluster Cartography» (CC), в якому повністю реалізовано розроблені алгоритми. Допоміжний блок пакету програм дозволяє адаптувати дані з будь-якого каталогу для аналізу розподілу галактик за допомогою основного блока CC;
- за допомогою пакету програм CC проведено детальний аналіз розподілу галактик для 460 скупчень галактик що містять 100 та більше галактик у полі скупчення за даними “Каталогу скупчень та груп галактик” Панько та Флина (PF);
- було вдосконалено схему морфологічної класифікації скупчень галактик завдяки статистично обґрунтованому детектуванню складних регулярних підструктур (хрести, пів-хрести, компактні та викривлені ланцюжки);
- за допомогою пакету програм CC проведено детальний аналіз розподілу галактик для 112 скупчень галактик, які розташовані в багатих областях (входять до надскупчень, що об’єднують від 5 до 9 членів) та 31 ізольованого скупчення галактик каталогу PF;
- проведено статистичний аналіз орієнтацій галактик у знайдених підструктурах та у скупченнях;
- проведено статистичний аналіз орієнтацій підструктур відносно найближчих скупчень галактик.

**Методи дослідження.** Основний метод дослідження є статистичний аналіз, який дозволяє визначати на статистично значущому рівні наявність різного роду підструктур у скупченнях галактик. Для цього здобувачем було

створено математичне забезпечення: пакет програм “Cluster Cartography” (CC), який дозволяє будувати двовимірні карти скупчення у тангенціальних координатах та проводити подальший аналіз розподілу галактик. Також було використано порівняння орієнтацій знайдених підструктур з орієнтаціями галактик у них та/або з напрямками на найближчого сусіда статистичними методами.

**Наукова новизна отриманих результатів.** В результаті виконання дисертаційного дослідження:

- *вперше* було використано чисельні критерії для статистично значущого виділення підструктур у скупченнях галактик;
- *вперше* було визначено морфологічні типи для 460 скупчень галактик відповідно до вдосконаленої схеми з використанням чисельних критеріїв;
- з 460 скупчень галактик 247 входять до каталогу галактик АСО та були класифіковані відповідно до концентрації до центру та положенню найяскравішої галактики, для них морфологічну класифікацію було *уточнено* відповідно до вдосконаленої схеми, всі інші скупчення було класифіковано *вперше*;
- *вперше* на великому однорідному високоякісному матеріалі проведено порівняння особливостей морфології скупчень галактик у багатих регіонах та ізольованих, дано пояснення знайденим розбіжностям;
- *вперше* було показано, що складні підструктури, а саме хрести, пів-хрести, компактні та викривлені ланцюжки є регулярними підструктурами, тобто їхнє існування обумовлено загальними закономірностями формування великомасштабних утворень;
- на якісному спостережному матеріалі було *підтверджено* зв'язок орієнтацій яскравих галактик у підструктурах з напрямом самої підструктури та її типом;

- *підтверджено* особливу роль найяскравішої та наймасивнішої галактики у скупченні;
- *підтверджено* вирівнювання скупчень галактик та/або напрям підструктури відповідно до напрямку на найближчого сусіда.

**Достовірність та обґрунтованість отриманих результатів** підтверджена повнотою та якістю базового спостереженого матеріалу, коректністю припущень, що було використано при розробці методики, рівнем статистичної значущості виділення підструктур, узгодженістю отриманих результатів із теоретичними моделями та дослідженнями інших авторів.

**Особистий внесок здобувача** у дисертаційному дослідженні включає обговорення постановки задачі дослідження та вибір методу аналізу. При виконанні дисертаційного дослідження здобувачем було повністю розроблено програмний код основного компонента пакету СС, який дозволяє проводити повний аналіз розподілу галактик у полі скупчення та виділяти підструктури, обчислювати нормовані щільності галактик в окремих ділянках та будувати відповідні гістограми для оцінки значущості пікових значень щільності. Також здобувачем було розроблено окремі детальні алгоритми для статистично обґрунтованого пошуку підструктур у скупченнях галактик.

У фахових виданнях, в роботах [A1 – A3](#) здобувач виконав аналіз розподілу галактик, підготував рисунки та брав участь у підготовці тексту та висновків. У роботі [A4](#) здобувач повністю описав можливості пакету СС, підготував рисунки та брав участь у формулюванні висновків. Всі статті та доповіді на конференціях підготовлено з використанням основного компонента пакету СС, автором якого є здобувач.

В роботах додаткового списку здобувач побудував карти скупчень, виконав частину аналізу розподілу галактик та брав участь у підготовці тексту, рисунків та висновків.

**Апробація матеріалів дисертації.** Основні результати, які було отримано за темою дисертаційного дослідження, доповідалися та обговорювалися на 11 міжнародних конференціях:

1. 5-th Gamow International Conference in Odessa: "Astrophysics and Cosmology after Gamow: progress and perspectives" 16-23 August, 2015, Odessa, Ukraine.
2. Міжнародна науково-практична конференція проблеми механіки та фізико-хімії конденсованого стану речовини. 17-19 вересня, 2015, Миколаїв.
3. Second Cosmology School "Introduction to Cosmology" Kielce (Poland, July 11-24, 2016).
4. 17-я Odessa International Astronomical Gamow Conference-School "Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radio-astronomy and Astrobiology" (Ukraine, Odessa, August 14-20, 2017).
5. 16 Українська конференція з космічних досліджень, 22-27 серпня, 2017, Одеса, Україна.
6. 18-th Odessa International Astronomical Gamow Conference-School "Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, Cosmomicrophysics, Radio-astronomy and Astrobiology" (Ukraine, Odessa, Chernomorka, August 12-18, 2018).
7. The Ninth Scientific Conference in Honor of Bohdan Babiy "Selected Issues of Astronomy and Astrophysics" (Lviv, October 2-5, 2018).
8. 6-а Гамовська міжнародна конференція «Нові напрями в астрофізиці, космології та фізиці високих енергій» та 19-а Гамівська літня школа «Астрономія на стику наук: астрофізика, космомікрофізика, космологія та гравітація, радіоастрономія та астробіологія», 6-th Gamow International Conference in Odessa "New Trends in Astrophysics, Cosmology and HEP after Gamow" and 19-th Gamow Summer School

- “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Radioastronomy and Astrobiology”, 11 – 18 серпня 2019 р., Україна, Одеса,
9. XX Gamow International Astronomical Conference-School in Odessa: “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology and Gravitation, High Energy Physics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology” 9 – 16 серпня 2020 р., Україна, Одеса.
10. 21-th Gamow International Astronomical Conference-School "ASTRONOMY AND BEYOND: ASTROPHYSICS, COSMOLOGY AND GRAVITATION, HIGH ENERGY PHYSICS, ASTROPARTICLE PHYSICS, RADIOASTRONOMY AND ASTROBIOLOGY". August 15-21, 2021, Odessa, Ukraine.
11. Міжнародна конференція “АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ НАЗЕМНОЇ СПОСТЕРЕЖНОЇ АСТРОНОМІЇ” (МАО-200) 27-30 вересня 2021 р., Миколаїв, Україна.

А також, результати, що наведено у дисертації, обговорювалися на розширених семінарах кафедри теоретичної фізики та астрономії, кафедри фізики та астрономії.

**Зв’язок роботи з науковими програмами:** дисертаційне дослідження виконувалося відповідно до плану науково-дослідних робіт Одеського національного університет імені І. І. Мечникова в межах кафедральної тематики (без цільового фінансування), науково-дослідна тема № 303 «Морфологія та динаміка багатоконпонентних космічних систем», наказ ОНУ імені І. І. Мечникова № 1730-18 від 22.09.20, номер державної реєстрації 0120U104575.

**Практичне значення отриманих результатів.** Результати, що було отримано здобувачем під час виконання дисертаційного дослідження, дозволяють деталізувати сценарії формування скупчень галактик. Їх буде



використано фахівцями, які працюють в галузі позагалактичної астрономії та космології, як спостережні тести для перевірки коректності теоретичних сценаріїв та результатів багаточастинкових симуляцій, а також для подальшого вивчення особливостей внутрішньої будови скупчень галактик як в Україні, так й за її межами, зокрема в Польщі (“Statistics in ExtraGalactic Astronomy and Astrophysics Group”, Institute of Physics, Opole University, Poland, <http://fizyka.wmfi.uni.opole.pl/grupa-badawcza-segaag/>).

Методика аналізу та математичне забезпечення – пакет програм Cluster Cartography – дозволяє проводити статистично обґрунтований пошук підструктур для двовимірного розподілу галактик у полі скупчення на базі будь-якого каталогу скупчень галактик, який має перелік галактик, що утворюють скупчення.

Поширені останнім часом численні проекти по використанню нейронних мереж для аналізу морфологічних особливостей об’єктів позагалактичної астрономії вимагає добре проаналізованого набору даних для тренування штучного інтелекту. Такий набір було створено під час виконання дисертаційного дослідження.

Крім того, отримані дані використовуються в ОНУ імені І.І. Мечникова у навчальному процесі в курсі ВБ 4.01 «Позагалактична астрономія» (ОП 104 «Фізика та астрономія» другого (магістерського) рівня вищої освіти).

Пакет СС та розроблений метод було використано при виконанні кваліфікаційних робіт бакалавра (Гончаров І.С. «Особливості орієнтацій галактик у компактних субскупченнях») та магістра (Заболотній В.В. «Субструктури в скупченнях галактик з помірною концентрацією»), а також при виконанні дослідження у Малої академії наук. Виконавець дослідження Захар Писаревський отримав диплом переможця заключного етапу конкурсу МАН у 2022 році, що свідчить як про рівень самого школяра, так й про зручність використання пакету СС в роботі.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з переліку умовних скорочень, вступу, 4 розділів, з яких перший є оглядовим, другий містить опис базового спостережного матеріалу, методики аналізу та пакету програм, який було створено під час виконання дослідження. Останні два розділи містять результати оригінальних досліджень, які було отримано з використанням створеного дисертантом пакету програм, та висновків, де підсумовуються результати роботи. Загальний обсяг дисертації становить 94 сторінки тексту, вона містить 24 рисунки та 8 таблиць. Список використаних джерел налічує 76 публікацій за темою дослідження.

## РОЗДІЛ I. СКУПЧЕННЯ ГАЛАКТИК ТА ЇХНЯ МОРФОЛОГІЯ

Розділ I є оглядовим, в ньому детально розглядаються принципи морфологічної класифікації скупчень галактик в оптичному та рентгенівському діапазонах та фізичне підґрунтя обох класифікацій. Також описується зв'язок внутрішньої будови скупчень з етапами їхньої еволюції.

### 1.1. Скупчення галактик, властивості та основні компоненти.

Розподіл речовини, як той, що випромінює, так й темної матерії DM у Всесвіті не є однорідним, хоча однорідність та ізотропність Всесвіту є базовим положенням космології. Розподіл речовини, що спостерігається у Всесвіті, починаючи з доповіді Йіевеера та Ейнасто на 79 симпозіумі Міжнародної астрономічної спілки в Таллінне [1] та публікації розгорнутої статті [2], отримав назву “комірчастий” розподіл. Відповідно тій початковій роботі виник та став стандартним термін «комірчаста структура Всесвіту». Галактики у цьому розподілі є маркерами різних елементів великомасштабної структури Всесвіту (LSS), що найпростіше спостерігаються. До елементів LSS відносяться: скупчення та надскупчення галактик – маркери додатних флуктуацій густини, войди – маркери від’ємних флуктуацій, філаменти та стіни. Крім того, спостерігаються також надмасштабні утворення, які потребують окремого вивчення.

З часів Мессьє і Вільяма та Джона Гершелей відомо, що галактики (за тих часів спіральні туманності) розподілені у просторі нерівномірно, вони показують тенденцію до скупчування, утворюючи більші за масштабом складні структури. У 20 – 30-х роках минулого сторіччя сформувалося уявлення про те, що скупчення галактик як області з істотним перевищенням середньої щільності ( $\frac{\Delta\rho}{\rho} \sim 10^3$ ), є типовим елементом розподілу галактик з

характерним розміром 5 – 10 Мрс. Можна вважати, що ущільнення в розподілі галактик утворюють ланцюжок: групи галактик => скупчення => надскупчення => надмасштабні структури. Групи галактик містять від 3 до 30 яскравих галактик; скупчення галактик містять від 30 до 300 і більше яскравих галактик. Групи та скупчення входять до складу більших за масштабом структур, таких як філаменти, стіни та надскупчення. Філаменти, у свою чергу, можуть бути як самостійними елементами LSS, так й утворювати стіни. Стіни оточують величезні порожнини – войди, в середині яких також спостерігають комірчастий розподіл речовини з густиною на 3 порядки меншою за середню у Всесвіті. Перетини філаментів утворюють вузли, де повстають великі скупчення або надскупчення. Різниця між окремими ланками ланцюжка групи =>...=> надскупчення є якісною, а не кількісною. Так, для того, щоб можна було говорити про форму якогось елемента LSS, потрібно, щоб він мав достатню різницю в густині відносно середнього значення та час його існування був достатній для того, щоб форма стабілізувалася. Якщо стабілізація ще не відбулася, можна говорити про еволюцію форми елемента LSS. Для груп галактик надлишок густини замалий для швидких еволюційних змін. Наприклад, Місцева Група галактик має підгрупи Чумацького Шляху, Андромеди та Трикутника з домінуванням відповідно Чумацького Шляху, M31 та M33 в кожній з підгруп. В майбутньому відбудеться злиття Чумацького Шляху та M31, що буде наступним кроком в еволюції Місцевої Групи. З іншого боку, для надскупчень галактик час віріалізації (встановлення рівноважної форми) дуже великий: він становить  $10^{10,5}$  років, що перевищує час Габбла або існування Всесвіту ( $10^{10,14}$  років відповідно до значення сталої Габбла – Леметра  $H_0 = (67.8 \pm 0.9)$  km/s/Mpc [3]).

Скупченням галактик приділяється особлива увага, тому що вони є гравітаційно зв'язаними утвореннями, для яких час віріалізації оцінюється у  $10^9$  років, що менше за час Габбла. Скупчення мають достатній надлишок густини, що забезпечується масами галактик, газу, що знаходиться всередині

скупчення та темної матерії, та достатній час, щоб встигнути утворити рівноважні структури. Тому ми можемо очікувати, що для спостережень доступні всі стадії їхньої еволюції від початкової до кінцевої. До того ж, скупчення галактик, невеликі утворення в порівнянні з космологічними масштабами, містять важливу інформацію про Всесвіт у цілому, їх знайдено тисячі, тому їхнє вивчення статистичними методами дає надійні результати щодо утворення та еволюції Всесвіту, які можна порівнювати з теорією та/або комп'ютерними симуляціями.

У теперішній час відомо, що до складу скупчень галактик, крім власне галактик, входять міжгалактичний газ та темна матерія. Сучасний огляд компонентів скупчень галактик наведено у роботі [4]. Газ, що є у скупченні, знаходиться у більшості скупчень у гідростатичній рівновазі. Маса газу приблизно у п'ять разів перевищує масу всіх галактик скупчення, інші його характеристики: температура  $T \sim 10^7 \cdot 10^8 \text{K}$  (за такої температури він спостерігається космічними обсерваторіями у рентгенівському діапазоні); щільність  $n \sim 10^{-3} \text{cm}^{-3}$ ; енерговиділення газу оцінюється на рівні  $L \sim 10^{43} \div 10^{46} \text{erg/s}$ . Крім того, газ всередині скупчення за хімічним складом відрізняється від первинного, його металічність (вміст важких елементів)  $Z \sim 0.3 Z_{\odot}$ . Це свідчить про те, що газ у скупченнях вже був підданий обробці і взаємодіяв із зорями та процесами міжзоряного та міжгалактичного середовища, які призвели до збагачення його хімічними елементами, що відмінні від первинного водню та гелію. Розподіл газу, не завжди є однорідним, та, подібно до розподілу галактик, є основою для класифікації рентгенівських скупчень. Це також розглядається, як відображення еволюції скупчень. У збурених скупченнях газ може мати складний та нерівномірний розподіл через взаємодії з іншими скупченнями, галактиками та іншими елементами великомасштабної структури Всесвіту.

Темна матерія (DM) у скупченнях детектується тільки за її гравітаційним впливом, методами сильного та слабого гравітаційного лінзування і мікролінзування наприклад [5]. При сильному гравітаційному

лінзуванні аналізують чітко виражені ефекти спотворення зображень далеких галактик загальною масою скупчення. При слабкому гравітаційному лінзуванні слабкі фонові галактики показують невеликі спотворення, а саме азимутальне подовження зображення. Для великої вибірки галактик ефект виявляється статистично та дозволяє скласти карту розподілу маси у скупченні.

За масою темна матерія домінує у скупченнях галактик, її частка приблизно у 24 рази більша за частку галактик. Зв'язок розподілів трьох компонентів скупчень витікає з теоретичних робіт, починаючи з класичних робіт Зельдовича [6] та Піблза [7]. Він підтверджується як чисельними комп'ютерними симуляціями [8, 9, 10, 11, 12], так і аналізом даних спостережень [13, 14, 15]. Взагалі розподіл всіх компонентів подібний [14], проте у випадку зіткнень ми спостерігаємо розділення галактик, гарячого газу та темної матерії [16]. У багаточастинкових комп'ютерних симуляціях, наприклад [8, 9, 10], на першому етапі розглядаються тільки елементарні маси DM, матерія, що випромінює, тобто газ та галактики, додається вже наприкінці обчислень. при таких розрахунках початкові флуктуації густини ведуть до формування войдів, скупчень та надскупчень галактик, тощо. Порівняння властивостей розрахованих елементів LSS із такими, що спостерігаються, дозволяє вказувати межі космологічних параметрів. Наприклад, спостережувана інтегральна функція мас  $MF$  скупчень галактик (розподіл кількості скупчень вище значення  $M$ ), є одним з критичних тестів для перевірки теорій формування LSS: вважається, що найбагатші, найбільш масивні скупчення утворюються з рідкісних високих піків у початкових флуктуаціях маси-щільності; бідніші скупчення та групи утворюються з менших, проте більш поширених флуктуацій.

Галактики є найменш масивною, проте найяскравішою в оптичному діапазоні складовою скупчень, що дозволяє вивчати внутрішню структуру скупчень методами наземної астрофізики. Властивості галактик, крім власного віку, пов'язані з еволюційним статусом скупчення, у якому вона

знаходиться. Завдяки оточенню та більшою за середню щільність галактик у скупченні, ймовірність злиття та формування великих еліптичних галактик збільшується. Відносна кількість еліптичних та дискових галактик у скупченні (Габбловський мікс) також може бути індикатором еволюційного статусу скупчення.

Ще одним фактором у скупченнях є функція світимості галактик (Luminosity Functions, LF): з неї можна дізнатися про первісні флуктуації щільності на невеликих масштабах та процеси, що руйнують/створюють галактики, змінюючи один тип галактик на інший.

## **1.2. Схеми морфологічної класифікації галактик.**

### **1.2.1. Морфологія скупчень за розподілом та властивостями галактик.**

Неоднорідний розподіл спіральних туманностей на небі відмічався ще до часу, коли було доведено, що туманність Андромеди є об'єктом за межами нашої Галактики, а її розмір вимагає розглядати спіральні туманності, як окремі “зоряні острови”. Систематичне вивчення скупчень галактик як астрофізичних об'єктів почалося після Другої світової війни, коли огляди неба Лікської та Паломарської обсерваторії і спектроскопічні спостереження забезпечили основну базу даних для аналізу розподілу галактик. Скупчення галактик на матеріали оглядів неба виділялися як області, в яких поверхнева щільність галактик перевищувала середню. Оскільки скупчення галактик досить пухкі утворення, що не мають чіткої межі, різні методи виділення галактик скупчення давали різні набори даних. Перші систематичні Каталоги скупчень галактик Ейбелла, AC, [17] та Цвіккі та ін. [18], містять різні списки скупчень галактик. Крім того, у каталозі Цвіккі та ін. [18] наведено карти скупчень з ізоконтурами, що відповідають зовнішньої межі скупчень.

Одразу з'ясувалося, що розподіли галактик всередині виділених скупчень не однакові: деякі скупчення мали чітку структуру, інші – ні. Тому й

АС каталог, й Каталог Цвіккі містять також перші спроби класифікації за різними параметрами, в АС навіть вводився “клас відстані”, оскільки за тих часів було небагато відомих відстаней до галактик.

У АС [17] та в його продовженні на південну півкулю, який зазвичай визначається як АСО, за фаміліями його авторів – Ейбелл, Корвін та Оловін [19], скупчення за особливостями структури класифіковано за багатством (багаті – бідні) та структурою (правильні – проміжні – неправильні). У той же час Цвіккі та ін. [18] розділяли скупчення на компактні – проміжні – розсіяні.

Пізніше Баутц та Морган [20] в основу своєї класифікації (ВМ) поклали три найяскравіші галактики скупчення. Перше, на що звертається увага, це наявність або відсутність масивної центральної галактики з урахуванням різниці в яскравості між цією та другою/третьою за яскравістю галактиками. Основних типів у ВМ класифікації три I, II та III, також для невпевнених випадків було введено проміжні типи I-II та II-III. Тип ВМІ має високу концентрацію до центру та дуже велику яскраву галактику у центрі, приклад такого скупчення А2199. Тип ВМІІ має дві або кілька дуже яскравих галактик у центрі, що менші, ніж сD, но є найбільшими еліптичними галактиками, приклад такого скупчення – Сoma (скупчення у сузір'ї Волосся Вероніки). Воно має 2 масивні та яскраві галактики у центрі. По мірі просування до останнього, III типу за ВМ, концентрація скупчення до центру істотно зменшується, домінуючі галактики зникають, хоча контраст щільності відносно галактик фону зберігається. Приклад такого скупчення – А2151 (Hercules, скупчення у сузір'ї Геркулес). Цю класифікацію було додано до АС та АСО каталогів.

До особливого типу галактик, сD, відносять надзвичайно яскраві еліптичні галактики (відрізняються на  $2^m - 2.5^m$  від звичайних еліптичних галактик, мають великі гало, до  $100 h^{-1}кpc$ ), розташовуються обов'язково у центрі скупчення у просторі та за швидкостями. До того ж сD показують не випадкові орієнтації: велика вісь галактики вирівнюється відповідно до великої осі скупчення. Вважається, що ці галактики утворюються шляхом



злиття кількох великих еліптичних галактик коли вони з часом мігрують до центру скупчення.

Пізніше Руд та Састрі (RS) [21] запропонували більш детальну класифікацію, яка враховувала положення вже 10 найяскравіших галактик у скупченні. В цій класифікації вже описано тип скупчень, які мають ознаки внутрішньої лінійної підструктури. Типи за RS описано відповідно до наступних ознак:

- cD – має центральну cD галактику, приклади A2029, A2199;
- B – дві домінуючі галактики, приклад, Coma;
- L – щонайменше 3 яскраві галактики розташовано на прямій (у проекції на картинну площину), приклад скупчення Perseus;
- C – компактне ядро A2065 (Corona Borealis);
- F – має пласку підструктуру, наприклад IRAS 09104+4109 або A2151 (Hercules));
- I – не має будь-якої концентрації до центру, наприклад A400.

За цією схемою можна розташовувати скупчення відповідно до їхнього еволюційного статусу: від початкових форм I та F до остаточної форми cD, що було зроблено авторами пізніше.

У 2002 році Лопец-Круз [22] запропонував схему, що у деякому сенсі об'єднує спроби попередників та приділяє особливу увагу cD галактикам. В цій схемі є підтип пласкі скупчення LF, скупчення з домінуючою над яскравою галактикою типу cD, які мають позначення cD-скупчення. Інші скупчення позначаються, як не-cD.

У скупченнях галактик спостерігаються галактики різних морфологічних типів, що дозволило Емлеру [23] визначити три типи скупчень: E-rich, S-poor и S-rich (багаті еліптичними, бідні спіральними та багаті спіральними). Емлер вважав, що за час еволюції скупчення в ньому спіральні галактики руйнуються, перетворюючись на еліптичні, тобто S-rich скупчення молоді, S-poor – проміжні за віком, E-rich – старі. Це дослідження

було виконано на невеликій вибірці з 15 близьких скупчень, тим не менш, з роботи витікає, що на ознаки еволюційного статусу вказує не тільки ступінь концентрації до центру та наявність cD галактики, а й взагалі склад галактичного населення скупчення.

Відмітимо, що всі класифікаційні схеми доповнюють одна одну, та використовуються індивідуально і окремо для кожного скупчення.

### 1.2.2. Вдосконалена схема морфологічної класифікації галактик.

У 2013 році Панько [24], спираючись на власний досвід вивчення розподілу галактик у скупченнях та на детальний огляд класифікаційних схем, що використовуються [25], запропонувала нову узагальнену схему. Ця схема дозволяє призначати морфологічні типи скупчень галактик, що спираються на об'єктивні статистично обґрунтовані критерії. Пізніше за участю автора цього дисертаційного дослідження [A4] схему було вдосконалено та адаптовано для виконання автоматичного застосування критеріїв. Остаточна [A4] схема поділяє скупчення галактик відповідно до наступних особливостей:

- ступеню концентрації галактик до центру скупчення (C – compact, компактні; I – intermediate, проміжні та O – open, розсіянні);
- наявності лінійної підструктури (L з цифрою від 5 до 11, яка показує ширину надщільної смуги у полі скупчення як частку діаметру скупчення, тобто від ширини полоси становить  $1/5$ , ...  $1/11$  діаметру). L5 та L7 відповідають позначці F у схемі [24]; L9 та L11 – відповідно позначці L;
- ролі найяскравіших галактик (cD для скупчень, що мають cD галактику у центрі або BG з цифрою яка показує число яскравих галактик, що розташовані не випадково). До cD галактику можна віднести, якщо її зоряна величина щонайменше відрізняється від наступної за яскравістю на  $2^m$ ;

- хрестоподібні утворення позначаються як X або Y, згідно до їхньої форми;
- інші особливості позначаються P (peculiar).

Параметри комбінуються, тобто, наприклад тип IL7BG4 це скупчення проміжної концентрації до центру з лінійною підструктурою ширина якої дорівнює 1/7 діаметру скупчення та 4 найяскравіші галактики у скупченні, що лежать в надщільній смузі (розташовані особливим чином). Зазвичай, такі галактики показують не випадкову орієнтацію: великі осі найкращих еліпсів, що описують контур галактик, частіше за все зорієнтовано вздовж надщільної смуги.

Порівняння класичних схем та вдосконаленої схеми Панько показано у [Таблиці 1.1](#).

Таблиця 1.1.

Порівняння схем морфологічної класифікації галактик  
в оптичному діапазоні

Загальна характеристика (за Ейбеллом)	Правильні	Проміжні	Неправильні
Симетрія	сферична	проміжна	відсутня
Центральна концентрація	висока	помірна	дуже незначна
Тип за Цвіккі	компактні	проміжні	розсіяні
Тип за Баутцом та Морганом	I, I-II, II	(II), II-III	(II-III), III
Тип за Рудом та Састрі	cD, B, (L,C)	(L), (F), (C)	(F), I
Тип за Лопец-Крузом	cD	non-cD	non-cD
Тип за Панько [24, A4]	C, (CL, CcD, CBG)	I, (IBG, IL, IP)	O, (OBG, OL, OP)

Чисельні критерії, що були запропоновані у роботі [24], під час виконання дисертаційного дослідження були уточнені, замість фіксованих значень, наприклад в межах  $1/3$  еквівалентного радіусу (9% площі скупчення) розташовано 30% галактик, за основу для призначення морфологічного типу при використанні створеного пакету програм беруться відповідні гістограми розподілу нормованої поверхневої щільності галактик та контраст пікового значення відносно середнього.

Додатково схема в роботі [24] враховує тип галактичного населення скупчень та виділяє E-rich та S-rich скупчення. За допомогою першої версії програми СС Панько та Флін проаналізували еліптичності галактик для 207 скупчень каталогу PF різних морфологічних типів [26]. В цьому дослідженні було показано, що у скупченнях всіх морфологічних типів присутні два типи розподілу еліптичності галактик: одномодовий та бімодальний. Для одномодового розподілу найвірогідніші еліптичності знаходяться у біні 0.2–0.3, що є характерним для еліптичних галактик. У бімодальному розподілі перший з максимумів також приходить на бін 0.2–0.3, другий розташовується в бінах від 0.4 до 0.6. Різниця між одномодовим та двомодовим розподілами є статистично значущою, що поділяє скупчення на багаті еліптичними або дисковими галактиками. Цей факт є важливим для оцінки еволюційного статусу скупчення: відносна кількість дискових (лінзоподібних та спіральних) галактик в ході еволюції скупчення показує тенденцію до зменшення. Водночас, результати роботи [26], які було отримано з використанням однієї з перших версій СС, показали, що однаковий відносний вміст еліптичних та дискових галактик можна знайти у скупченнях різного ступеню концентрації.

### 1.2.3. Морфологія скупчень у рентгенівському діапазоні

Температура гарячого газу всередині скупчення не є однорідною, відповідно у розподілі рентгенівського випромінювання спостерігаються численні “гарячі точки”, пов'язані з галактиками. У найбільших щільних областях газ може встигнути охолонути, що призводить до виникнення у гарячому газі холодних потоків та фронтів.

За загальним розподілом гарячого газу, який спостерігається в рентгенівському діапазоні, у 1992 році Джонс і Форман [27] розробили варіант класифікації. В цій класифікації рентгенівські скупчення поділяються на незбурені та збурені. До перших відносяться скупчення в яких у рентгенівському випромінюванні присутні:

- S (single): скупчення, в яких не виявлено підструктур або відхилень від симетрії;
- D (double): скупчення, що мають два піки у розподілі випромінювання приблизно однакового розміру та яскравості;
- P (primary with small secondary): скупчення, що мають два піки у розподілі випромінювання, проте перший принаймні вдвічі яскравіший за другий
- E (elliptical): один пік яскравості, проте контури розподілу скоріше еліптичні, ніж круглі.

До збурених скупчень відносяться такі, що мають декілька областей підвищеної рентгенівської яскравості (C, complex), зміщений відносно загальної контуру пік яскравості (offset center). Також до збурених скупчень можуть відносити ті, у яких у рентгенівському випромінюванні домінують одна або декілька галактик, а не газ. У типі E іноді спостерігають ознаки складної структури, тобто його можна розглядати, як перехідний тип від незбурених до збурених скупчень. Особливі випадки, а саме, варіанти холодних фронтів, скупчення, що стикаються (наприклад, відоме скупчення «Куля»), до цієї класифікації не входять.

Морфологічна класифікація рентгенівських скупчень тісно пов'язана з вивченням їхньої внутрішньої структури відповідно до розподілу галактик. При порівнянні схеми Панько [24], яку було створено для визначення морфологічних типів скупчень галактик у видимому діапазоні із сучасною класифікацією у рентгенівському діапазоні [27, 28], знайдено добре узгодження (Таблиця 1.2).

Таблиця 1.2.

Порівняння схеми морфологічної класифікації галактик  
в рентгенівському діапазоні та схеми Панько

Морфологічні класи (Джонс і Форман [27, 28])	Прикла д ([28])	Середня світимість ( $\times 10^{43}$ ерг $\text{с}^{-1}$ ), ([28])	Морфологічні класи (Панько [24])
S (один симетричний пік)	A401	29.3	CcD
D (подвійний центр)	A98	22.1	BG2 (L)
P (primary with a small secondary)	A85	19.9	L (P)
E (еліптичні)	A2256	30.8	L5 – L7, P (I, O)
C (складні або кратні підструктури)	A514	9.6	P (BG)
G (primarily galaxy emission)	A2666	0.4	cD, BG (C, I)

В останньому стовпчику у дужках Таблиці 1.2 показано основні морфологічні типи схеми Панько [24], які в оптичному діапазоні відповідають особливостям розподілу газу всередині скупчення.

### 1.3. Морфологічні типи скупчень галактик як еволюційні стадії.

Класифікацію RS [21] автори представили у вигляді камертона, на якому напрям еволюції скупчень відповідає руху від I або F до C.

Спираючись на результати чисельного моделювання Уайта [29], Карневалі та ін. [30], Фарукі та ін. [31], а також на дані про вміст галактик і тенденції їхнього розподілу у скупченнях, Струбл і Руд [32] переглянули схему RS, перетворивши «RS камертон» на «лінійну» схему, що описує еволюцію скупчень від нерегулярних до регулярних або шляхом рівномірного стискання за всіма напрямками, або через стискання з різними швидкостями з формуванням на проміжному етапі скупчення типу L з лінійною підструктурою. Порівняння обох схем (з роботи [32]) показано на [рис.1.1](#).

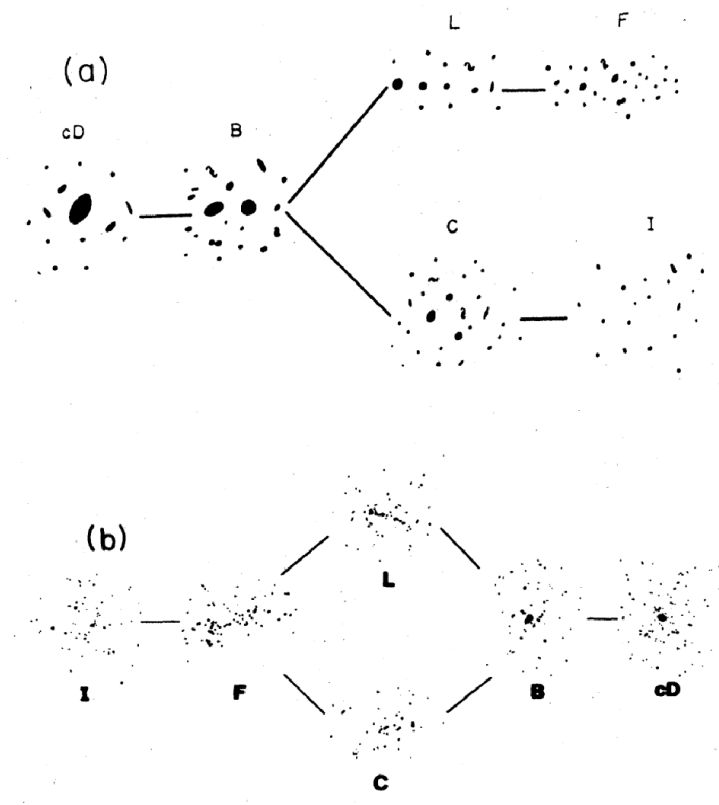


Рис 1.1. (а) Діаграма Руда-Састрі «камертон» для класифікації багатих скупчення галактик, з напрямом еволюції від правильних (ліворуч) до неправильних (праворуч); (б) «Лінійна» схема Струбла та Руда, що описує еволюцію скупчень від неправильних (ліворуч) до регулярних (праворуч), з роботи [32]

Найпростіша модель нелінійного колапсу початкових флуктуацій щільності передбачає сферично-симетричні збурення радіуса  $R$  з однаковою щільністю. Початкові космологічні флуктуації вважаються гаусовими, де локальні максимуми є стартовими точками кластеризації. Конкретні сценарії розвитку локальних максимумів при інфляційному розширенні досліджувалися в роботах [32 – 35]. Бардін та ін [36], незважаючи на деякі недоліки їхньої моделі, знайшли, що багаті скупчення мають встигнути віриалізуватися та набувають форму тривісного еліпсоїду. Зв'язок нелінійних флуктуацій густини в адіабатичній моделі холодної DM призводить до необхідності врахування спостережливих обмежень, наприклад [37, 38]. Пібблз [39] дослідив спектр коливань маси, що приводить до формування галактик та скупчень. З цих робіт витікає, що моделі нелінійного колапсу початкових флуктуацій щільності дають адекватні наближення для шкали часу, тому вони часто використовуються для статистичних досліджень популяцій галактичних гало. Важливі деталі були досліджені вже у 1988 році за допомогою 3D чисельного космологічного моделювання [40]. Ця робота була однією з найперших спроб відстежити динаміку як баріонів, так й темної матерії.

Великі чисельні  $N$ -body симуляції, починаючи з найвідомішого Millennium Simulation [41], моделювань у Illustris Project [42], EAGLE Simulation [43], HORIZON-AGN Simulation [44], у роботах [45], [46], [47] показують, що первинні флуктуації густини стискаються нерівномірно – з різною швидкістю за різними напрямками. Більш того, в різних регіонах варіації густини руйнуються з різними часовими масштабами, оскільки згущення не мають постійної густини та чітко визначеної межі, тому згортання флуктуації має набір часових масштабів, що робить її подовженою в часі [48]. Крім того, коливання густини первинного поля оточені іншими та різноманітними флуктуаціями. У речовині, що оточує флуктуації припливними силами формуються філаментні (ниткоподібні) структури, що утворюють мережу з вузлами [49]. Скупчення галактик продовжують



накопичувати матерію з філаментів, що стає основним процесом акреції речовини у подальшій еволюції скупчень галактик. Цей процес є важливим для збільшення маси скупчення. Поступове нарощування матерії з навколишнього космосу допомагає скупченням стати більш масивними і впливає на їхню динаміку та фізичні властивості. Розвиток великомасштабних структур йде під впливом двох протилежних дій: Габбловського потоку, тобто зростання масштабного фактору, та гравітації у межах гравітаційно обмежених областей. Оскільки скупчення галактик є гравітаційно зв'язаними, їхня еволюція повинна приводити до стискання та формування чіткої внутрішньої будови.

Сценарії еволюції відповідають принципам, які лежать в основі відповідності морфологічного типу скупчення його еволюційному статусу, проте варіант формування скупчення шляхом швидкого стискання за двома напрямками при уповільненому стисканні в третьому, у схемі RS та її лінійній формі відсутній. Наявність внутрішніх філаментарних структур у скупченнях була знайдена на невеличкій вибірці Панько та Андрієвським ще у 2012 році [50], що дало поштовх до систематичного детального вивчення особливостей їхньої внутрішньої будови, у тому числі при виконанні даного дисертаційного дослідження.

#### **1.4. Орієнтації галактик та скупчень галактик.**

Ще одним особливим напрямом у дослідженні скупчень галактик є вивчення закономірностей, що відповідають за не випадкові орієнтації галактик у скупченнях. У класичній роботі Бінггелі [51] на спостережному матеріалі з 44 скупчень було показано, що орієнтації скупчень галактик залежать від оточення та мають тенденцію до вирівнювання в напрямку на найближчого сусіда. Цей ефект, що отримав назву «ефект Бінггелі», підтверджується, як статистично значущий, багатьма дослідниками

[наприклад, [52](#), [53](#)]. Ефект Бінггелі та відстань, на якій він спостерігається є одним з тестів, що дозволив обрати  $\Lambda$ CDM модель Всесвіту, як таку, що найкраще відповідає спостережним фактам, а саме, Онуора та Томас [\[54\]](#) показали, що відстань, на якій виникає ефект Бінггелі тільки в  $\Lambda$ CDM космологічній моделі відповідає тій, що спостерігається.

Орієнтації галактик у скупченнях також не випадкові. Для вибірки з 122 багатих скупчень каталогу ACO [\[19\]](#) ван Кампен та Рі знайшли значущу кореляцію між орієнтацією самого скупчення та його найяскравішої галактики, причому найсильніше ефект проявляється для cD галактик [\[55\]](#). В роботах Годловського та ін. [\[56\]](#) та Байєра та ін. [\[57\]](#) автори вказують на можливий зв'язок анізотропії з можливою наявністю підструктур. Пізніше Панько та ін. [\[58\]](#) на матеріалі з 1056 скупчень каталогу PF [\[59\]](#) довели, що саме для скупчень ВМІ вирівнювання найяскравішої галактики є значущим, а ефект Бінггелі простежується для скупчень ВМ I типу на відстанях до  $45 h^{-1}$  Mpc. Виходячи з цих результатів, у даному дисертаційному дослідженні також аналізуються орієнтації галактик у підструктурах.

## РОЗДІЛ II. СПОСТЕРЕЖНИЙ МАТЕРІАЛ ТА МЕТОДИКА ЙОГО АНАЛІЗУ

Розділ II присвячено опису спостережного матеріалу – Каталогу скупчень та груп галактик Панько та Фліна [59], на базі якого було проведено дисертаційне дослідження. У Розділі описано алгоритми аналізу двовимірного розподілу галактик у полі скупчення, їхня реалізація у пакеті Cluster Cartography та послідовність дій у програмі для повного аналізу розподілу та орієнтацій галактик у скупченні.

### **2.1. Мюнстерський червоний огляд неба як база для пошуку скупчень галактик.**

Каталог скупчень та груп галактик [59], далі PF, що є спостережною базою для даного дисертаційного дослідження, було створено на базі списку галактик Мюнстерського червоного огляду неба (MRSS), робота Унгруе та ін. [60]. В свою чергу, список галактик є одним з результатів оцифровки та ретельного аналізу 217 астронегативів, які охоплюють приблизно 5 тисяч квадратних градусів південного неба з галактичною широтою  $b < -45^\circ$ . Негативи на фотоемульсії Eastman-Kodak IIIa-F з використанням світлофільтру RG 630 забезпечили робочий діапазон довжин хвиль у області 6300–6900 Å, фотометрична смуга огляду  $r_F$ . Основним інструментом для отримання спостережного матеріалу Червоного південного атласу неба Європейської південної обсерваторії (Southern Sky Atlas R, European Southern Observatory, ESO) була 1-метрова камера Шмідта обсерваторії Ла-Сілья (Чілі). Фотоплатівки було отримано у 1978 – 1990 роках, для якісної фотометрії було використано ПЗЗ спостереження. Калібрувальні спостереження для визначення зоряних величин проводилися у фотометричних смугах  $B$ ,  $V$ ,  $R$  на трьох телескопах: 0.9-м телескопі

обсерваторії Ла-Сілья, Чілі; 1.0-м телескопі Південно-африканської астрономічної обсерваторії (SAAO), Сьюзерленд, південна Африка та 0.6-м телескопі Південної обсерваторії університету Торонто (UTSO), Лас Кампанас, Чілі. В результаті похибка визначення зоряних величин для галактик становить не більше, ніж  $r_F=0.18^m$ .

Переведення масиву спостережень у цифровий формат було здійснено на двох мікроденситометрах PDS 2020GM<sup>plus</sup> Мюнстерського Астрономічного інституті у 1991 – 1993 роках. Ці дуже якісні пристрої забезпечили сканування платівок з роздільною здатністю 5000 *dpi*. Весь процес сканування, фотометрії галактик, визначення зоряних величин, форми у проекції на картинну площину, виключення артефактів детально описано у роботі Унгруе та ін. [60].

Підкреслимо деякі моменти. Скан-файли, отримані на мікроденситометрах, згорталися до розміру пікселя 1.0". За об'єкт приймалося зображення розміром не менше 4-х пікселів. Пошук об'єктів проводився автоматично за допомогою програми SEARCH; подальша автоматична класифікація об'єктів проводилася програмою CLASS. Обидві програми базуються на відомому алгоритмі FOCAS. Після видалення артефактів було проведено розділення на зорі та галактики, причому це розділення базувалося на наборі з 18 параметрів для кожного зображення. В такий спосіб було отримано попередній список галактик MRSS. Всі об'єкти, що мали відхилення від повного набору з 18 ознак, проходили далі візуальний контроль. Тому можна вважати, що остаточний список галактик MRSS, містить тільки галактики та є дуже якісним матеріалом для подальших досліджень. Галактики, яскравіші за  $12^m$ , було виділено, як галактики переднього фону. Загальна кількість галактик до зоряної величини  $r_F=21^m$  у списку [60] перевищує 5.5 мільйонів, проте у межах повноти каталогу, тобто до зоряної величини  $r_F=18.3^m$ , їх значно менше: 1.2 мільйона [59].

Для кожної галактики MRSS Унгруе та ін. [60] наводять її екваторіальні координати, зоряну величину  $r_F$  (виміряну та виправлену за міжзоряне

поглинання у нашій Галактиці), ефективний радіус та велику й малу осі галактики у наближенні найкращого еліпсу у кутових секундах, еліптичність  $E$  цього еліпсу та позиційний кут великої осі, який відлічується від напрямку на північ за годинниковою стрілкою. Всі параметри обчислено за розподілом яскравості по пікселях у межах зображення галактики [60].

Каталог галактик MRSS містить великий обсяг інформації. На жаль, астронегативи та методика створення списку галактик не дозволили визначити а ні морфологічний тип кожної галактики, а ні відстань до неї. Тим не менш, список галактик MRSS є хоч й обмеженим, проте дуже якісним однорідним спостережним матеріалом, що дозволяє виконувати на його основі вагомі дослідження [наприклад, 58, 61 – 64].

## 2.2. Каталог скупчень галактик Панько та Фліна.

Список галактик MRSS у межах повноти каталогу, тобто до зоряної величини  $r_F = 18.3^m$  налічує понад 1 мільйон 200 тисяч галактик. Панько та Флінн обрали його як вихідний матеріал для створення Каталогу скупчень та груп галактик [59]. Для створення каталогу використовувалася методика мозаїк Вороного (Voronoi Tessellation Technique, VTT). Цей метод дозволяє виявляти як симетричні скупчення вихідних об'єктів, так і скупчення неправильної форми, як це було показано, наприклад, у роботах Рамелла та ін. [65, 66].

VTT метод був використаний у вигляді процедури “*kiang*”, що є ядром автоматичного пакету Voronoi Galaxy Cluster Finder, *VGCF*, (Рамелла та ін. [67]), який Панько та Флінн адаптували для роботи зі списком галактик MRSS. В результаті для кожного скупчення було створено список галактик, що знаходяться в його межах. Дуже яскраві галактики переднього фону було виділено ще на підготовчому етапі, слабкі галактики віддаленого фону розподілені досить рівномірно. За потреби зменшити внесок галактик фону,

їх можна статистично відсікти, виключивши галактики, слабші за  $m_3+3^m$ , що є стандартним прийомом.

Півосі скупчень каталогу PF було визначено методом коваріаційного еліпсу за формулами:

$$\begin{cases} a^2 = \frac{x_{mid}^2 + y_{mid}^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{x_{mid}^2 - y_{mid}^2}{2}\right)^2 + (xy_{mid})^2} \\ b^2 = \frac{x_{mid}^2 + y_{mid}^2}{2} - \sqrt{\left(\frac{x_{mid}^2 - y_{mid}^2}{2}\right)^2 + (xy_{mid})^2} \end{cases} \quad (2.1)$$

де  $x_{mid}$ ,  $y_{mid}$ ,  $x_{mid}^2$ ,  $y_{mid}^2$  и  $(xy)_{mid}$  відповідні статистичні моменти тангенціальних координат галактик.

Еліптичність скупчення  $E$  та позиційний кут великої осі найкращого еліпсу  $\theta$  розраховувалися за формулами:

$$E = \frac{a-b}{a} = 1 - \frac{b}{a} \quad \text{tg } 2\theta = 2 \frac{xy_{mid}}{x_{mid}^2 + y_{mid}^2} \quad (2.2)$$

Детально методику описано у роботі [68].

При такому підході значення еліптичності скупчення залежить від положення всіх галактик. Наявність лінійних підструктур або смуг підвищеної щільності галактик призводить до збільшення значення  $E$ . Значення позиційного кута також буде зближено до напрямку лінійних підструктур ([рівняння 2.1 та 2.2](#)) за їх наявності.

Для оцінки відстаней до скупчень каталогу було проведено порівняння скупчень каталогу PF з класичним каталогом АСО [19] та каталогом АРМ [69]. Фотометричні відстані до скупчень каталогу PF визначаються за найкращим співвідношенням:

$$\lg z_{est} = -3.771 + 0.166 \cdot m_{10} \quad (2.3)$$

де  $m_{10}$  – зоряна величина 10-ї за яскравістю галактики [61].

У такий же спосіб визначалися фотометричні відстані й для скупчень каталогу APM [69].

Вже перші спроби проводити аналіз властивостей скупчень галактик з прив'язкою до їхньої морфології, наприклад [58, 50, або 63] показали, що:

- 1) MRSS та PF каталоги є дуже перспективним матеріалом для вивчення особливостей двовимірного розподілу галактик у полі скупчення;
- 2) класичні схеми морфологічної класифікації скупчень галактик повинні бути адаптовані до сучасного рівня та спостережного матеріалу.

Другий висновок призвів до створення вдосконаленої схеми морфологічної класифікації скупчень галактик (Панько, [24]). Водночас великий обсяг спостережного матеріалу вимагав створення математичного забезпечення для швидкого аналізу. Загальна кількість груп та скупчень галактик у каталозі PF перевищує 6 тисяч. Якщо розглядати скупчення, що налічують 50 та більше галактик, то їх кількість перевищує 1500. Розташування скупчень галактик каталогу PF з кількістю галактик  $N_g \geq 50$  показано на [рис. 2.1](#). Стрілками на рисунку вказано деякі відомі надскупчення галактик та надмасштабні структури.

Для дисертаційного дослідження ми обрали скупчення, що містять більше 100 галактик. По перше, 100 одиниць вже дозволяють робити статистично обґрунтовані висновки, серед таких скупчень можна було очікувати наявності скупчень різного еволюційного статусу. Програма SS, яку було створено під час дисертаційного дослідження дуже прискорила виконання аналізу, тому у наступних етапах дослідження було додатково розглянуто скупчення, розташовані як у багатих областях, так і ізольовані



скупчення. Основною метою було порівняння впливу найближчих сусідів на формування особливостей внутрішньої структури скупчень галактик.

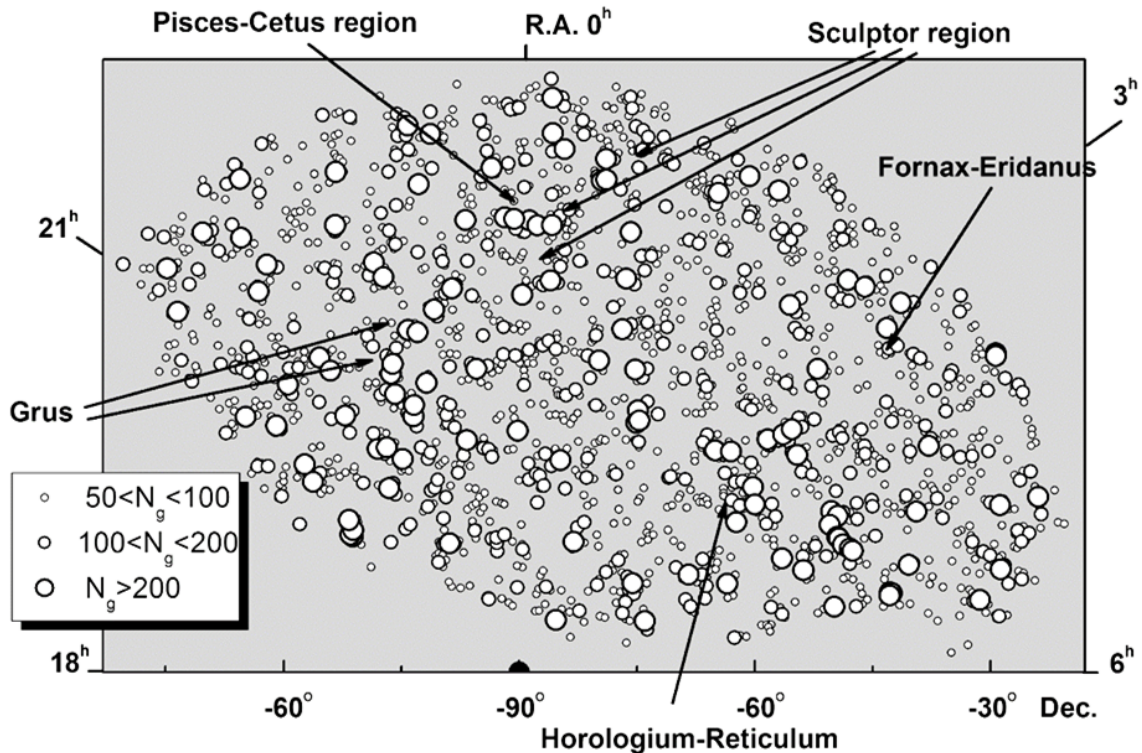


Рис. 2.1. Розподіл понад 1500 скупчень каталогу PF з  $N_g \geq 50$  на небесній сфері. Розмір символу показує кількість галактик в полі скупчення. Південний полюс світу – точка з позначкою  $-90^\circ$

### 2.3 Алгоритм автоматичного вивчення особливостей розподілу галактик у полі скупчення.

У астрофізичних дослідженнях, зокрема у вивченні великомасштабної структури Всесвіту, необхідність у якісному візуальному представленні даних є однією з ключових. Візуалізація дозволяє виявляти особливості та структури, які не завжди очевидні при табличному чи текстовому



представленні інформації. Для створення основної програми СС було обрано мову програмування С++ у середовищі С++ Builder.

При створенні пакету СС на початковому етапі враховувалося наступне:

- необхідність візуалізації розташування галактик у полі скупчення. Це дає змогу виконувати попередню оцінку наявності чи відсутності особливостей у скупченні;
- можливість автоматичного пошуку області найбільшої концентрації галактик та візуального контролю результату, що поділяє скупчення на класи відповідно до ступеня концентрації галактик до центру, С–І–О;
- можливість пошуку смуги підвищеної концентрації галактик, також з наступним візуальним контролем результату, для класифікації відповідно до ступеню концентрації галактик до виділеного напрямку;
- можливість будувати гістограми розподілу еліптичностей галактик для виділення скупчень, багатих на дискові галактики;
- можливість експортувати рисунки стандартного розміру для використання у статтях та презентаціях доповідей;
- зберігати результати обчислень.

У подальшій роботі виявилася необхідність додаткових опцій у програмі, а саме:

- візуалізувати не тільки розташування галактик, а ще їхній розмір, їхню форму у наближенні найкращого еліпсу та орієнтацію великої осі;
- можливість показувати найяскравіші галактики іншим кольором (відтінком);
- використання режиму «промінь маяку» (LNB) для пошуку складних підструктур – хрестів, напів-хрестів та вигнутих щільних смуг.
- Експортувати списки галактик, що утворюють підструктури.

Всі ці завдання було успішно вирішено під час створення пакету СС. Використання пакету дозволяє швидко та детально досліджувати скупчення галактик у двовимірній проекції, знаходячи особливості внутрішньої будови на статистично значущому рівні.

#### **2.4. Пакет Cluster Cartography та його використання.**

Пакет СС складається з двох частин. Перша частина – окрема допоміжна програма – виконує підготовку даних з каталогу RF, перераховуючи їх у вхідний формат основного блоку. Такий шлях було обрано, маючи на увазі подальшу можливість використання основної програми СС для обробки даних різних каталогів скупчень галактик, для яких існують списки галактик, що входять до нього. Підготовча програма перетворює екваторіальні координати галактик у тангенціальні, перераховує зоряну величину галактики до умовного розміру символу, яким на карті показано галактику, та додає необхідні дані з вхідного каталогу. Основна програма СС, у вигляді ехе-файлу, який просто копіюється без додаткових умов та не вимагає додаткових налаштувань, дозволяє будувати карти скупчень у стандартному форматі та проводити аналіз двовимірного розподілу галактик у полі скупчення.

Далі описано роботу остаточного варіанту програми СС, що було створено здобувачем при виконанні дисертаційного дослідження.

##### **2.4.1. Підготовка даних та візуалізація скупчення.**

Після аналізу розподілу розмірів скупчень галактик каталогу RF для побудови карт ми обрали стандартний розмір 4000"×4000". При такому розмірі розподіл галактик є наочним, а те, що він є стандартним, дуже зручно для порівняння скупчень. Тільки 3 скупчення мають кутові розміри більші за обраний розмір, це можна відкоригувати при підготовці даних.

Вид вхідної інформації (формат каталогів PF та MRSS) має вигляд, що наведено у [Таблиці 2.1](#).

Таблиця 2.1.

Приклад формату вхідної інформації,  
фрагмент скупчення PF 0381-1789

Скупчення:										
<b>0381-1789 3.8171204 -17.885726</b>										
1550 7196600										
<b>308 227 129</b>										
<b>1688 1288 0.24 38.9 14.68 15.06 15.74 158.8 0.32 9.2</b>										
Галактики:										
MRSS ident	$N_{pix}$	$R$	$A$	$B$	$E$	$PA$	$m$	$m_{cor}$	$RA(h)$	$Dec(^{\circ})$
549-115824	39	2.2	4.11	2.86	0.35	124	17.32	17.18	3.788175	-17.800667
549-115723	29	2.49	5.05	2.97	0.49	28.6	17.89	17.75	3.788285	-18.005161
549-115155	97	3.42	7.21	4	0.54	144.8	16.48	16.33	3.789824	-17.770277
549-115112	34	2.14	4.58	2.54	0.54	143.7	17.56	17.41	3.789947	-17.751526
549-114968	66	2.77	4.86	4.24	0.14	149.4	16.8	16.65	3.790315	-17.779137
549-114865	104	3.26	6.75	3.72	0.54	36.9	16.22	16.06	3.790598	-17.695040
549-114671	102	3.34	6.75	3.91	0.50	133.3	16.4	16.27	3.790887	-18.055273
...										

Для скупчення у єдиному полі наведено інформацію відповідно до [59].

Жирним шрифтом підкреслено послідовно:

- перший рядок – номер скупчення за каталогом PF та екваторіальні координати центру скупчення (в годинах та градусах) в епосі 2000.0,
- третій рядок – кількість галактик у полі скупчення та кількість галактик у межах зоряних величин від  $m_3$  до  $m_3+3^m$ , де  $m_3$  зоряна величина третьої за яскравістю галактики,
- четвертий рядок – розміри великої та малої півосей скупчення, його еліптичність та позиційний кут великої осі, обчислені за формулами [2.1 – 2.3](#) та зоряні величини першої, третьої та десятої за яскравістю галактики;
- Інші параметри скупчення не є істотними у даному дослідженні.

Всі наступні рядки містять інформацію про кожну галактику відповідно до MRSS:

- номер галактики у полі MRSS;
- кількість пікселів у зображенні галактики;
- ефективний радіус зображення галактики у пікселях, велика та мала осі зображення галактики в наближенні найкращого еліпсу у пікселях;
- еліптичність зображення галактики та позиційний кут його великої осі, що вимірюється від напрямку на північ проти годинникової стрілки;
- виміряна зоряна величина у фотометричній смузі MRSS  $r_F$  (червона область спектру);
- скоректована за наближеною моделлю міжзоряного поглинання зоряна величина;
- екваторіальні координати галактики.

Кількість рядків у файлі дорівнює кількості галактик у полі скупчення. Звісно, у робочому файлі заголовки відсутні.

Розташування галактик у картинній площині з центром проекції проводиться допоміжною програмою за стандартним перетворенням екваторіальних координат на прямокутні тангенціальні:

$$\begin{cases} x = -206265 \frac{\cos \delta \sin(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta \sin \delta_0 + \cos \delta \cos \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)}, \\ y = 206265 \frac{\sin \delta \cos \delta_0 - \cos \delta \sin \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta \sin \delta_0 + \cos \delta \cos \delta_0 \cos(\alpha - \alpha_0)} \end{cases} \quad (2.4)$$

де  $\alpha_0$  і  $\delta_0$  – екваторіальні координати центру скупчення

Мінус у першій формулі системи [2.4](#) враховує напрям прямого піднесення (проти годинникової стрілки), множник 206265 переводить радіани стандартного перетворення координат до кутових секунд. В результаті на карті скупчення галактики можна показувати символами, розташування яких відповідає розташуванню галактик на небі. Однак, звичайні символи – хрестики або точки одного розміру – не є досить добрим відображенням галактики на карті скупчення. Тому для покращення наочності було вирішено показувати галактики колами, розмір яких ілюструє зоряну величину галактики або її розмір у кутових секундах.

Після роботи по підборі найкращого варіанту відображення зоряна величина галактики з каталогу MRSS перераховується у діаметр символу за формулою:

$$m' = 3 \cdot 2^{0.6(18.5-m)} + 6 \quad (2.5)$$

де  $m'$  – діаметр зображення галактики на карті;

$m$  – зоряна величина галактики відповідно до каталогу MRSS [[10](#)].

При такому розмірі символу галактики добре видно, можна оцінити особливості розташування галактик, проте завжди треба мати на увазі, що реальні розміри галактик набагато менші.

В такий спосіб готується вхідний набір для роботи основної програми СС. Структуру вихідного файлу показано у [Таблиці 2.2](#).

Координати  $X$ ,  $Y$  та діаметр символу розраховуються за формулами [2.3](#) та [2.4](#) відповідно, еліптичність  $E$  та позиційний кут великої осі  $PA$  беруться з MRSS без перетворень. Такий підхід дозволяє використовувати основну програму СС для роботи з даними будь-якого каталогу, що має частину описної інформації. Якщо в каталозі, з якого буде братися інформація, немає значень еліптичності та позиційного кута великої осі зображення галактики, відповідним змінним присвоюється значення 0.

Таблиця 2.2.

Структура вхідного файлу основної програми пакету СС  
на прикладі фрагменту того ж скупчення PF 0381-1789

X	Y	$m'$	$E$	$PA$	
1488	304	11	0.35	124	0
1481	-432	10	0.49	29	0
1404	414	13	0.54	145	0
1398	482	10	0.54	144	0
1378	382	12	0.14	149	0
1364	685	14	0.54	37	0
1347	-612	13	0.50	133	0
1299	550	13	0.43	36	0
...					

Для відтворення форми зображення галактики, у наближенні еліпсу, розміри його великої та малої осі,  $A$  та  $B$ , розраховуються вже в основній програмі СС з діаметру символу  $m'$  (формула 2.3) з урахуванням еліптичності  $E$  (відповідний стовпчик у Таблиці 2.1). Формули для визначення великої  $A$  та малої  $B$  осей відповідного символу ми отримали, виходячи з наступних міркувань: якщо еліптичність галактики визначається, як  $E = 1 - \frac{B}{A}$ , а площа символу, що зображує галактику, як  $S$ , то покладаємо, що площа еліпса, що зображує галактику повинна бути рівною площі круга для неї ж:

$$S = \pi \frac{(m')^2}{4} = \pi \frac{A \cdot B}{4}$$

З урахуванням цього припущення було отримано формули для обчислення розмірів символу:

$$A = \frac{m'}{\sqrt[4]{1 - 2E + E^2}}; \quad B = \frac{(m')^2}{A} \quad (2.5)$$

де  $A$  та  $B$  осі символу, що відповідає зображенню галактики,

$E$  – еліптичність

Формат назви вхідного файлу для основного блоку СС повинен бути “назва скупчення.txt”. Символ, що розділяє цілу та дробову частини даних, точка або кома, визначається налаштуванням комп’ютера.

Приклад побудованої карти та відповідної області неба показано на [рис. 2.2](#). На фрагменті з DSS (Association of Universities for Research in Astronomy ©), що адекватно відтворює вигляд відповідної ділянки неба, візуально важко відрізнити слабкі галактики скупчення від зір та галактик фону. На карті ж присутні тільки галактики, що лежать у полі скупчення. Можна помітити область підвищеної концентрації галактик, де також розташовані найяскравіші з них. Ще добре помітно відповідність орієнтацій великих осей галактик на карті та на знімку з DSS (POSS).

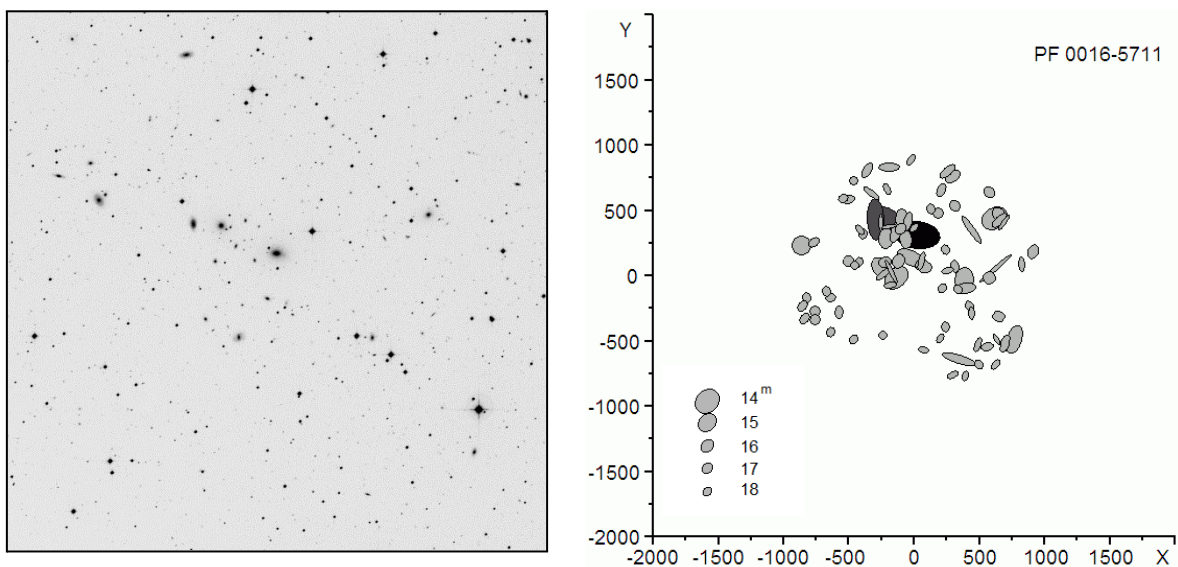


Рис. 2.2. Область скупчення ACO 0464, або PF 0016-5711 з DSS (Association of Universities for Research in Astronomy©) та відповідна карта в одному масштабі. На карті проілюстровано відповідність зоряної величини галактики розміру її символу

Якщо є необхідність показати на карті галактику відповідно до її розміру у кутових секундах (з MRSS), то при розмірі карти 4000"×4000"

розміри галактик потрібно помножувати на коефіцієнт, що дорівнює множнику від 5 до 8.

На основі аналізу результатів роботи з різними параметрами карт програма СС дозволяє показувати галактики на карті як кола однакового розміру, як кола, розміри яких відповідають зоряним величинам, як еліпси, орієнтовані відповідно до позиційного кута зображення галактики ([рис. 2.2](#), ліворуч), розміри яких відповідають зоряним величинам або кутовим розмірам галактик. Що саме потрібно, обирає дослідник. Переключення між режимами виконується просто відповідною кнопкою на панелі меню програми.

#### **2.4.2. Основні команди та візуальна оцінка особливостей розташування галактик у полі скупчення.**

Вся робота з аналізу двовимірного розташування галактик у полі скупчення виконується повністю за допомогою основної програми СС. Головне вікно програми показано на [рис. 2.3](#). В першому рядку відображається розташування файлу, що обробляється. Нижче розташовано стандартне меню та окремі кнопки для виконання повного аналізу: **Load, Save Chart, Sort, C.M.1, C.M.2, C.M.3, C-I-O, L-F, P, E, Density** та **Y>0**.

Головне вікно поділяється на дві частини, ліворуч знаходиться інформація про галактики, праворуч – графічне поле. Кожна з команд викликає окреме власне вікно, в якому у верхній частині задаються параметри аналізу. Дослідник може використати параметри за замовчуванням, або обрати інші значення та змінювати їх, щоб досягти найкращого результату. У нижній частині робочого вікна з'являються результати проміжних обчислень програми, які можна копіювати для подальшої роботи за необхідності. В графічному полі розташовуються карти скупчення в різних форматах відображення галактик або результати аналізу у вигляді гістограм розподілу відповідних робочому вікну величин.



У нижню частину головного вікна (позначка **Chart name**) можна ввести назву скупчення, яка автоматично буде відображатися на всіх експортованих рисунках (наприклад, на [рис. 2.2](#) ліворуч, це PF 0016-5711).

Перший крок, що дозволяє швидко візуально оцінити розташування галактик у скупченні, це оцінка поверхневої щільності галактик (кнопка **Density**), [рис.2.3](#).

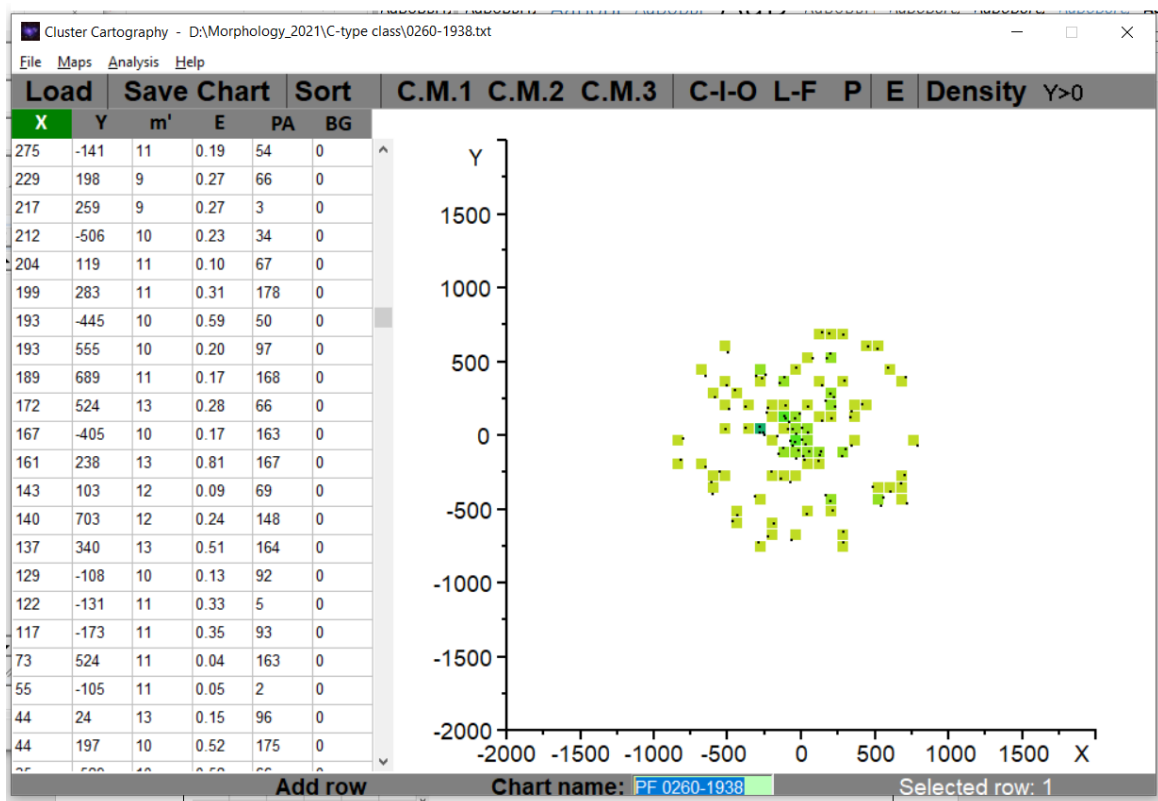


Рис.2.3. Робоче поле основної програми СС та приклад оцінки поверхневої густини галактик. У найтемнішій клітинці знаходиться максимальна для цього скупчення кількість галактик

В режимі **Density** на карту скупчення накладається сітка, галактики можна показати точками. За вибором дослідника встановлюється розмір робочої комірки, щільність галактик позначається кольором: чим більша кількість галактик увійде в клітинку тим темнішою вона буде. Кольори було підібрано таким чином, щоб найщільніше клітинки було добре видно як на екрані, так й в експортованому рисунку при перетворенні до “сірої шкали”.

Дослідник також може обрати зручний для себе режим: розмір відображати чи сховати лінії сітки, відображати чи сховати точки, що показують положення галактик.

Режими **С.М.1**, **С.М.2**, **С.М.3** (**С.М.** – Створення Мапи) будують карту скупчення у різних варіантах відображення галактик: орієнтовані еліпси; кола, розміри яких відповідають характеристиці галактики (про яку саме характеристик йдеться, зоряна величина або кутовий розмір, визначає дослідник у підготовчій програмі); кола однакового розміру. Як показав досвід аналізу основного набору скупчень, режим **С.М.2** (кола різного розміру) впливає на уявлення про скупчення найменше. Найкращі результати дає послідовність: команда **С.М.1** (орієнтовані еліпси), далі команда **С.М.3**, яка надає можливість зосередитися виключно на розташуванні галактик. Режим **С.М.2** залишився в остаточній версії програми для роботи з іншими наборами спостережних даних.

За необхідності можна візуально підкреслити найяскравіші галактики на карті темнішим кольором. Для цього командою **Sort** вхідний масив треба відсортувати за зоряною величиною від найяскравішої до найслабкішої галактики. Далі дослідник змінює 0 у колонці **BG** на 1 для найяскравішої галактики, на 2 для другої, й т. і. до 9-ої. Ступені забарвлення закладено у програму. Як показав досвід роботи, цифри, більші за 3, для більшості скупчень використовувати недоцільно. Галактики, що були відмічені, відображаються на карті темнішими ([рис. 2.2](#) ліворуч). Щоб найяскравіші галактики не перекривалися слабкими, яка на [рис. 2.2](#) (ліворуч), при створенні карти сортування треба повторити, ще раз натиснувши **Sort** та заново побудувати карту обною з команд **С.М.** Повторне змінює порядок нанесення галактик на карту у графічному вікні – від найслабкішої до найяскравішої. Відображення скупчення при цьому стає більш наочним.

### 2.4.3. Визначення морфологічного типу скупчення за ступенем концентрації до центру скупчення.

Наступним кроком є обґрунтована оцінка ступеню концентрації скупчення галактик до центру, яка виконується командою/кнопкою **C-I-O**. За способом виділення галактик, що належать до скупчення, положення найщільнішого його участку не завжди співпадає з геометричним центром, тим більше, частина скупчень мають неправильну форму. Програма дозволяє ввести координати центру (X,Y) скупчення власноруч, або знайти його в автоматичному режимі (команда **Auto C**). При автоматичній роботі проводиться сканування по полю скупчення, при якому перелічується кількість галактик у колі обраного розміру.

На [рис. 2.4](#). показано результат роботи програми у режимі **C-I-O** з розміром кола  $0.2R$ . Центр кола, в якому програма знайшла максимальну кількість галактик, виводиться у вікно X, Y, як можливе положення ядра скупчення. На [рис. 2.4](#). це значення тангенціальних координат 32 та 1.

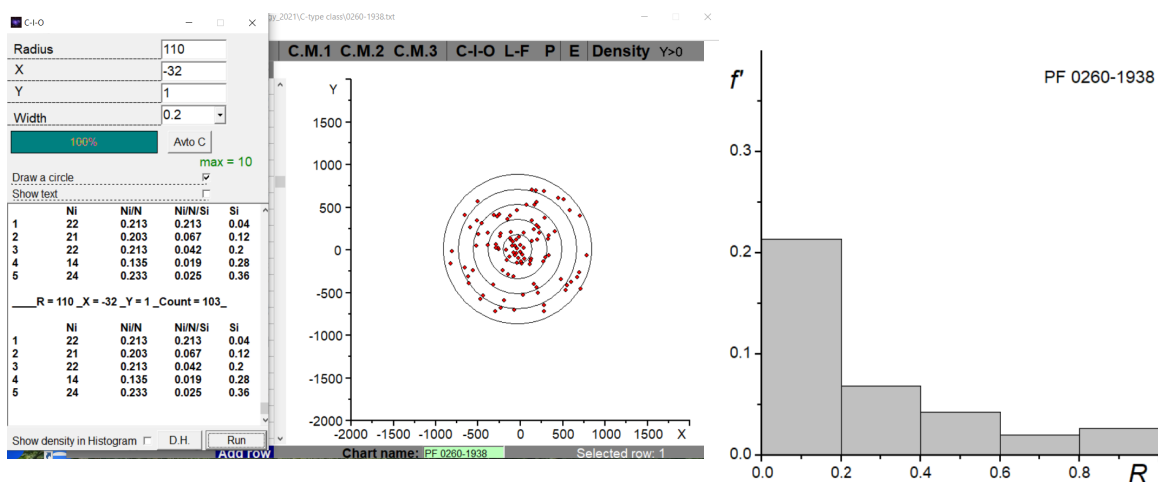


Рис. 2.4. Приклад оцінки ступеня концентрації скупчення до центру: робоче та графічне вікно (ліворуч) та експортована гістограма (праворуч) зі значущим перевищенням концентрації у центрі

У поле **Radius** треба вказати приблизний радіус скупчення в умовних одиницях. Все, що знаходиться за межами цього радіусу, в розрахунки не потрапляє ([рис. 2.4](#), показано **Radius 110**). За умовчанням у вікні **Radius** стоїть значення 100. Це не є розмір скупчення, це робоче значення, яке пов'язано з роздільною здатністю графічного вікна.

Для визначення приналежності точок до кола, для кожної з них, з поточними координатами  $(x, y)$ , знаходимо відстань  $D$  від цієї точки до центра кола стандартним чином, далі:

Якщо  $D < R$ , то точка знаходиться всередині кола.

Якщо  $D = R$ , то точка знаходиться на колі.

Якщо  $D > R$ , то точка знаходиться зовні кола.

Всі галактики скупчення аналізуються в такий спосіб для центра кола, що сканує робочу область. Час обробки залежить від кількості галактик, наприклад, при 209 галактиках у скупченні, час, за який програма проводить пошук, дорівнює 30 секундам. Всі інші операції виконуються ще швидше.

За вибором дослідника обирається кількість та ширина кільцевих зон, для яких розраховується поверхнева щільність галактик (**Width** – ширина зони), причому нормована щільність  $f'$  розраховується з урахуванням як повної кількості галактик у скупченні, так й площі кожної кільцевої зони ( $N_i$  – кількість галактик в  $i$ -тому кільці;  $N_i/N$  – кількість галактик в  $i$ -тому кільці поділена на загальну кількість галактик;  $N_i/N/S_i$  – поверхнева щільність галактик,  $S_i$  – площа  $i$ -того кільця), [рис. 2.4](#), праворуч вікно розрахунків. Таке нормування дозволяє будувати гістограми у загальному масштабі та порівнювати розподіли при різній кількості галактик у скупченні. В ході виконання роботи визначився найбільш надійний розмір центральної області, який доцільно використовувати при визначенні ступню концентрації до центру:  $0.15R - 0.20R$ , де  $R$  – робочий радіус при аналізі.

Після обчислень кнопкою **Д.Н.** дослідник виводить у графічне вікно гістограму розподілу нормованої поверхневої щільності галактик  $f'$ . Як і

будь-яку інформацію графічного вікна, гістограму можна експортувати, як готовий рисунок в форматі Name.bmp.

Якщо згущення галактик істотно зміщено від геометричного центру скупчення, пікове значення оцінюється як контраст щільності у порівнянні із середньою щільністю галактик, за виключенням надщільної області. Скупчення PF 0260-1938, яке показано на [рис. 2.4](#), відноситься до типу С, концентроване за [24]: у колі площею 0.04 від повної площі скупчення знаходяться більше 20% галактик.

#### 2.4.4. Детектування лінійної підструктури у скупченні.

Команда **L-F** дозволяє проводити аналіз скупчення на наявність концентрації до виділеної лінії, що є ознакою філаментарної підструктури або площини, що розташовано під невеликим кутом до променя зору. Як і у вікні **C-I-O**, досліднику потрібно вказати радіус скупчення в умовних одиницях та координати центру. Якщо ці дані вже було вказано у вікні **C-I-O**, вони автоматично будуть підтягнуті й в це вікно. У поле **N** потрібно вказати кількість смуг (скупчення буде умовно поділене на цю кількість), ширина смуги **Bandwidth** вираховується автоматично.

Дослідник має можливість вказати **PA (L, F)** – кут, який створює смуга підвищеної густини з віссю  $X$ , якщо це відомо. В іншому випадку програма шукає цю смугу автоматично (потрібно натиснути кнопку **Auto turning**). Для цього масиву даних з тангенціальними координатами галактик накладається сітка у вигляді паралельних смуг, що обмежені зовнішнім колом скупчення. Далі координати галактик перераховуються стандартним чином перетворення координат при повороті осей з кроком  $1^\circ$ . Наступним кроком для кожного кута визначається належність галактики до відповідної зони, та визначається кут, при якому нормована на повну кількість членів скупчення поверхнева щільність галактик  $f'$  сягає максимуму.

Кількість смуг, для яких проводиться аналіз може бути 3, 5, 7, 9, 11. З міркувань симетрії кількість смуг повинна бути непарною. На відміну від режиму **C-I-O**, в якому програма дозволяє обрати будь-яке значення для розміру зони, поділ на смуги фіксований. Цифри відповідають ширині смуги у частках діаметру  $D$ :  $\frac{D}{3}$ ,  $\frac{D}{5}$ , ...  $\frac{D}{11}$ . Площі для кожної кількості смуг було заздалегідь обчислено та внесено до коду програми, як фіксовані значення. При розрахунках приведеної поверхневої щільності галактик  $f'$  площа центральної смуги приймається за 1, площі інших смуг нормовано на площу центральної смуги. З досвіду роботи витікає, що поділ на 3 смуги не має сенсу, він практично не дає значущої інформації. Поділ на 5 та 7 смуг повертає результуючий розподіл для широкої смуги, що у роботі [24] було описано, як F. Поділ на 9 та 11 смуг відповідає позначці L [24].

Кнопка **D.H.** знову виводить у графічне вікно гістограму розподілу нормованої на повну кількість членів скупчення поверхневу щільність галактик  $f'$ , тільки вже у смугах. Для скупчень, що мають значущу концентрацію до центру, центральна частина до уваги не приймається, що забезпечує команда **Cut Center**.

Програма дозволяє підкреслити кольором 2 смуги підвищеної щільності (команди **Select area with the highest density** та **Select area with second density**) та показати кількість галактик у кожній смузі (команда **Show text**). Приклад скупчення проміжної концентрації до центру зі смугою шириною, тип I L7, наведено на [рис. 2.5](#).

Центральна область підвищеної концентрації у скупченні PF 0034-2570, не співпадає з геометричним центром скупчення, проте смуга підвищеної концентрації проходить саме через цю область. Смуга є статистично обґрунтованою: максимум нормованої щільності, що їй відповідає, є значущим, навіть при виключенні з розрахунків центральної області (не замальовані галактики у колі на центральній смузі розподілу галактик). У конкретному випадку ([рис. 2.5.](#)) виключення центральної області робить

центральный пік нижчим, але він залишається значущим. Такі підструктури більшою частиною є філаментарними/лінійними.

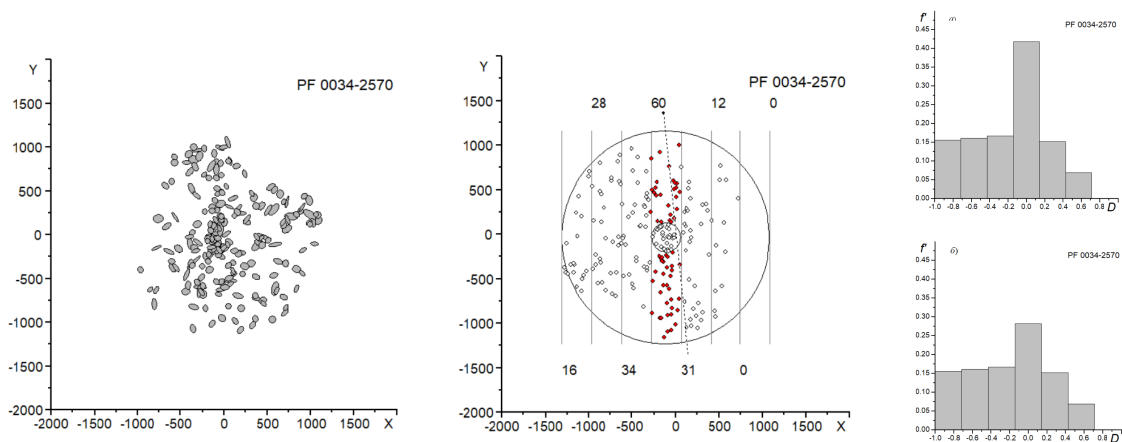


Рис. 2.5. Скупчення типу I L7, розподіл галактик по смугах та гістограми, на підставі яких скупчення класифіковано, з урахуванням галактик центральної області, а) та без них, б)

Виключати центральну щільнішу частину обов'язково треба робити для скупчень типу I та С. Якщо після виключення центральної зони пік щільності залишається

При візуальній оцінці особливостей розподілу галактик у полі скупченні PF 0034-2570 (рис. 2.5) можна запідозрити наявність в ньому Y-подібної підструктури, проте числовий аналіз її існування не підтверджує.

Загалом, режим L-F дозволяє оцінити достовірність більш складних регулярних підструктур, а саме, X-подібних перетинів філаментарних підструктур, або хрестів. Систематичний пошук таких особливостей виконано вперше у даному дисертаційному дослідженні. Один з результатів такого пошуку наведено на рис. 2.6, скупчення PF 2070-3523. Скупчення не має явної концентрації до центру, обидві смуги шириною  $D/9$  детектуються впевнено, піки на гістограмах значущі, а найяскравіші галактики лежать саме у смугах та вирівнюються вздовж них. Особливість будови скупчення PF 2070-3523 можна описати, як OL9XL9 BG 5.

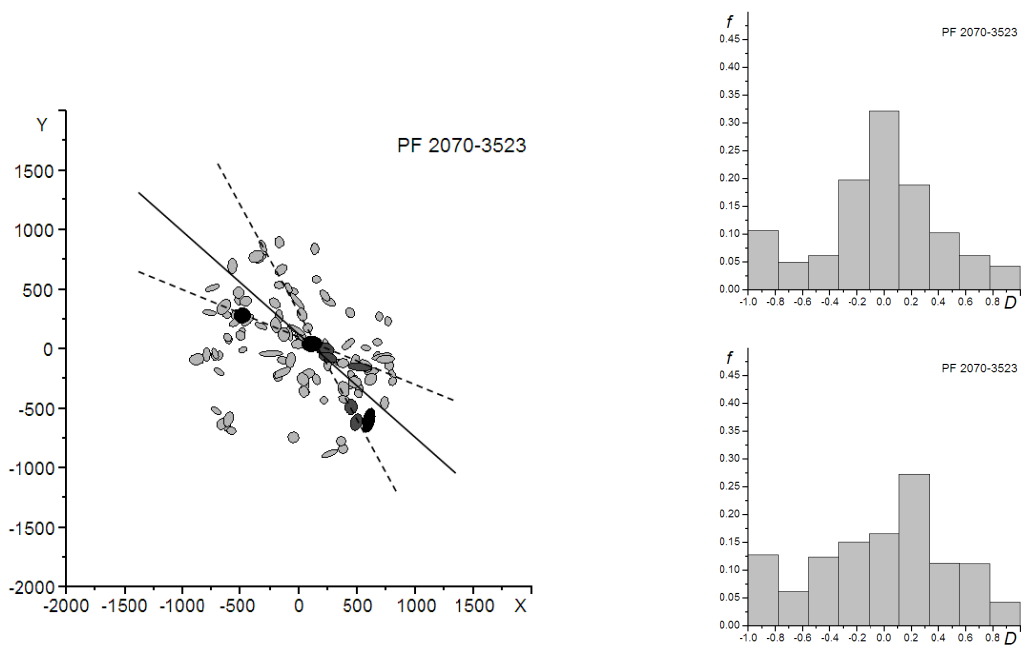


Рис. 2.6. Хрестоподібна структура, 2 філаменти, що перетинаються. Праворуч показано гістограми для кожної смуги

Перший максимум розподілу для хрестоподібних структур програма знаходить в автоматичному режимі, другий потрібно знаходити досліднику самостійно. До того ж, в деяких скупченнях на картах видно Y-подібні структури (півхрести), та інші утворення. Тому виникла потреба у пошуку й таких незвичайних підструктур іншою командою.

Треба додати, що смуга, в якій знаходиться максимальна для даного скупчення кількість галактик, буде знайдена у будь-якому випадку, проте це значення не буде істотно відрізняється від середнього, ймовірність існування лінійної підструктури буде нижче рівня достовірності.

#### 2.4.5. Пошук Y-подібних структур та режим LightHouse Beam.

Найшвидший метод пошуку неоднорідностей поверхневої щільності галактик нелінійної форми – це аналіз розташування галактик по секторах,



команда **P**. Приклад аналізу показано на [рис. 2.7](#). Сектори, що містять найбільшу кількість галактик, програма **SS** маркує кольорами. Необхідну кількість секторів вказує дослідник. Досвід роботи показав, що обирати кількість секторів більшу за 16 не має сенсу.

Команда **P** працює швидко, проте добре показує тільки чітко виражені підструктури. В такий спосіб можна зробити першу оцінку, кількісне обґрунтоване детектування вимагає іншої методики. Тому було розроблено алгоритм та додано до програми код, який було названо **LightHouse Beam** (промінь маяка). Команда/кнопка **Y>0** підраховує галактики в верхній половині смуги заданої ширини (червоний прямокутник), відносно якої обертається масив координат галактик з кроком  $1^\circ$ , як у команді **L-F**. Ширина смуги може бути від  $1/3$  до  $1/11$  діаметру скупчення.

Кількість галактик для кожного “проміння” виводиться у робоче вікно та може бути скопійована для подальшої роботи за необхідності, наприклад, для згладжування розподілу або пошуку екстремумів іншими методами. Також, як у попередніх випадках, в графічне вікно можна вивести розподіл нормованої кількості галактик за усіма кутами від  $0$  до  $360^\circ$ . Оскільки площі, в яких ведуться підрахунки, однакові, нормування проводиться тільки за загальною кількістю галактик у скупченні. Це дозволяє будувати гістограми розподілу кількості галактик у стандартному масштабі. Для наочності на діаграмі додаються кути від  $0^\circ$  до  $380^\circ$ , для яких значення кількості галактик переносяться з кутів  $0^\circ$  до  $20^\circ$ .

На прикладі скупчення **PF 2199-2391** показано використання секторного та **LightHouse Beam** аналізу, [рис. 2.7](#).

На гістограмі ([рис. 2.7](#)) виразно видно 3 піки щільності, тобто Y-подібний перетин філаментів або пів-хрест. На [рис. 2.7](#) піки та відповідні філаменти на карті вказано стрілками. Позиційний кут  $PA$  філаментів розраховується зі значень кутів на гістограмі  $\alpha$  як  $PA=180^\circ-\alpha$ .

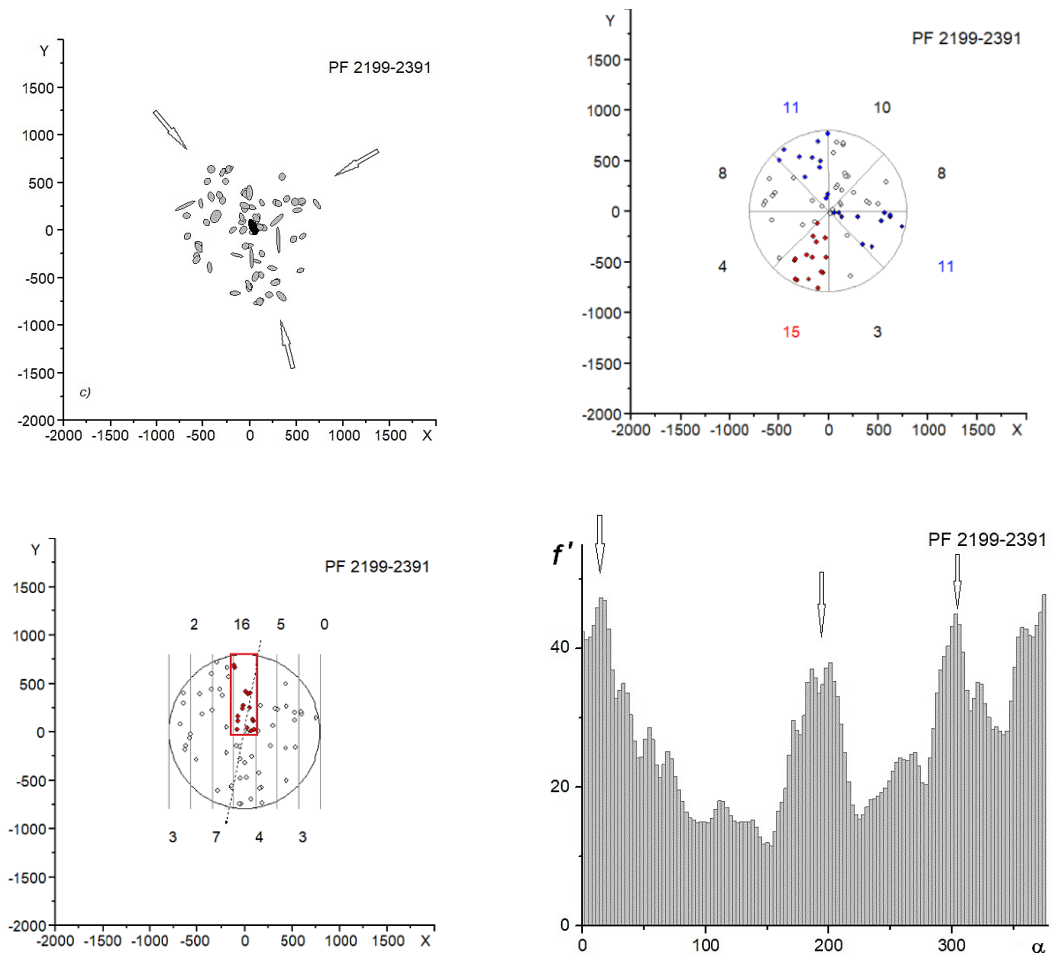


Рис. 2.7. Пошук Y-подібні структури. Показано послідовно: карта скупчення, аналіз щільності по секторах, положення області підрахунку галактик в режимі **LightHouse Beam** та гістограма розподілу, що показує 3 піки (Y-подібну підструктуру)

З точки зору еволюції такий варіант розподілу щільності, Y-подібне примикання, можливий, коли скупчення почало формуватися на перетині філаментів LSS різної потужності. Це підтверджується положенням найяскравішої (тобто наймасивнішої) галактики: вона знаходиться у місці об'єднання філаментарних підструктур.

В режимі **LightHouse Beam** також є можливість виключити з аналізу центральну щільнішу зону.

### 2.4.6. Аналіз еліптичностей галактик.

В програмі СС реалізовано ще один тип аналізу: вивчення розподілу галактик у скупченні за їхніми еліптичностями, команда **E**. Діапазон можливих значень еліптичностей 0.0 – 1.0 розділено на 10 бінів, гістограма розподілу виводиться у графічне вікно автоматично. Для галактик MRSS морфологічні типи не відомі, тому розподіл еліптичностей дозволяє оцінити співвідношення дискових/еліптичних галактик у скупченні. Можливі два типи розподілів еліптичностей, одномодовий та бімодальний що відображає різні внески від спіральних та еліптичних галактик. Цей параметр – S-root або S-rich – також додається до загальної характеристики скупчення. На [рис. 2.8.](#) наведені обидва варіанти розподілу  $E$ , які побудовано для скупчень проміжної концентрації з однаковими фотометричними червоними зміщеннями.

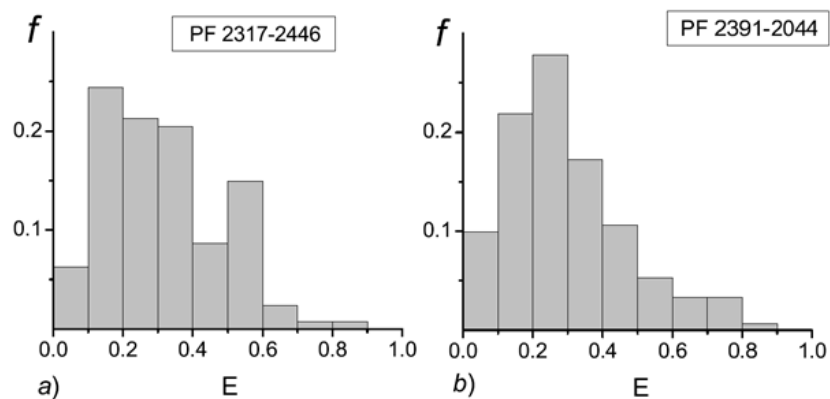


Рис. 2.8. Приклади бімодального (a) та одномодового (b) розподілів еліптичностей забояжнь галактик у скупченнях

Розподіл еліптичностей, тобто форма галактик у проекції також є одним з параметрів перевірки теоретичних висновків щодо формування великомасштабних структур.

В основному робочому вікні програми СС зберігаються всі проміжні розрахунки. Їх можна скопіювати та вставити до таблиці Excel або

Гугл-таблиці, для подальшої роботи – за необхідності. Окремо можна експортувати набір, що стосується галактик (**Save Table**).

## 2.5. Основні результати за розділом II.

Створений під час виконання дисертаційного дослідження варіант пакету СС є закінченим продуктом. Він дозволяє виконувати всі дії, необхідні для детального аналізу двовимірного розподілу галактик у полі скупчення з автоматичним пошуком особливостей та візуальним контролем. Поділення пакету СС на дві складові – допоміжну та основну програми – дозволяє проводити статистично обґрунтовані визначення морфологічного типу для будь-якого каталогу скупчень галактик, якщо в ньому є хоча б екваторіальні координати членів скупчення, що дозволяє шукати різного типу особливості розподілу галактик у полі скупчення.

Кожна з команд СС відповідає за пошук конкретних особливостей: ступеню концентрації до центру скупчення, наявності лінійних та/або хрестоподібних підструктур, інших регулярних утворень у скупченні. Окремо можна оцінити роль найяскравіших галактик та відносну кількість еліптичних/дискових галактик. Всю інформацію, що пов'язана з розрахунками можна експортувати для подальшої роботи. Робочу таблицю, в якій найважливішим галактика дослідник присвоїв мітку, також можна зберегти для подальшої роботи (команда **Save Table**).

Вся інформація, що з'являється у графічному вікні, може бути збережена також у графічному вигляді, причому ім'я скупчення автоматично розміщується у верхньому правому куті карти або гістограми. В такий спосіб робота по підготовці рисунків до доповіді або публікації значно спрощується.

Формат рисунків .bmp є неперервним безвтратним форматом зображень, що забезпечує збереження графічних даних без стиснення та здатний підтримувати різноманітні типи зображень з високою якістю та деталізацією.

Алгоритм роботи по повному аналізу внутрішньої будови скупчення виглядає наступним чином:

1. Допоміжною програмою за даними вхідного каталогу (каталог PF у даній роботі) створюється вхідний масив у шаблоні вхідного файлу CC для обраного скупчення. Символ, що розділяє цілу та дробову частини даних, точка або кома, визначається налаштуванням комп'ютера. Формат назви вхідного файлу “назва скупчення.txt”. У вхідному файлі повинні бути тангенціальні координати галактик у кутових секундах відносно центру скупчення, та, якщо відомо, адаптована зоряна величина галактик, еліптичність зображення та відповідний позиційний кут. Якщо цих даних немає, то адаптована зоряна величина у вихідному масиві повинна мати значення 9, еліптичність та позиційний кут – 0. Для побудови карти у такому випадку потрібно обрати команду **С.М.3** (зображення галактик кружками одного розміру). Остання цифра у вхідному файлі для всіх галактик повинна бути 0.
2. Вхідні дані завантажуються до програми CC. Окремо у відповідне вікно заноситься назва скупчення.
3. У графічному вікні будуються різні варіанти карти скупчення. Як показав досвід даної роботи, доцільно використовувати 2 режими: зображення галактик орієнтованими еліпсами та кружками однакового розміру. Режим **С.М.2** (розміри символів визначаються зоряною величиною галактики) залишився для випадку, коли відомі тільки зоряні величини галактик.
4. Далі дослідник має можливість візуально оцінити ймовірну наявність областей підвищеної щільності (**Density**).
5. Подальший крок – проводиться оцінка значущості піку нормованої щільності галактик за відповідною гістограмою, тобто визначення типу скупчення відповідно його концентрації до центру. З досвіду роботи рекомендовано використовувати значення шагу поділу на кільцеві зоні 0.1R, 0.15R або 0.2R.

6. Пошук лінійної підструктури та визначення її потужності (L5, L7, L9 або L11). З досвіду роботи рекомендовано використовувати при аналізі розмір смуг  $\frac{D}{5}$ ,  $\frac{D}{7}$ , ...  $\frac{D}{11}$  (D – діаметр скупчення). Програма автоматично проводить пошук смуги найбільшої нормованої щільності галактик та визначає її позиційний кут. Для значущих лінійних підструктур при зміні ширини смуги позиційний кут стабільний у межах  $5^\circ$ . Також позиційний кут за необхідності можна задавати самостійно. Відповідний розподіл щільностей буде розраховано. За необхідності центральну надщільну зону з розрахунків можна виключити. Для скупчень, що мають ознаки концентрації до центру, це потрібно робити обов'язково, інакше можна отримати хибне детектування надщільні смуги.
7. Пошук хрестоподібних підструктур (**LightHouse Beam**). Аналіз проводиться за схемою п.6.
8. Оцінка ролі та (можливо) типу найяскравіших галактик. Для цього необхідно провести сортування (команда **Sort**), замінити у стовпчику BG значення 0 на 1 для найяскравішої галактик, 2 для другої і т.д. Значення 4 та далі до 9, використовувати недоцільно. Для побудови має сенс повторно використати команду **Sort**, щоб змінити порядок, у якому галактики виводяться у графічне вікно на “від слабкішої до найяскравішої”. Тип найяскравішої галактики як cD можна визначити, якщо вона яскравіша на інші яскраві галактики на  $2^m$  та має еліптичність не більше, ніж 0.3. Дискову (спіральну) галактику можна визначити, якщо зображення має еліптичність більшу за 0.7. Інші варіанти визначення типу галактики для конкретного набору даних не доступні.
9. Таким же чином, заміною 0 на 1, 2..., можна виділити галактики, що утворюють підструктуру та вивести їх в окремий список (за потреби).

10. Оцінити внесок еліптичних/дискових галактик за гистограмою розподілу еліптичностей.
11. На кожному етапі за необхідністю зберегти рисунок у форматі .bmp або результат розрахунків.

Робота по аналізу розподілу галактик у скупченні виконується швидко, експорт карт та гістограм у стандартній формі дозволяє просто додавати їх до публікацій та презентацій. Пакет СС є дуже зручним інструментом дослідження будови скупчень галактик. Він вже використовується при виконанні кваліфікаційних робіт з астрономії на кафедрі фізики та астрономії ОНУ імені І.І. Мечникова.

Всі задачі Розділу II виконано у повному обсязі. Результати, що подано у Розділі II, опубліковано у статті [A4](#), тезах конференцій [A5 – A8, A15, A17](#) та обговорювалося на 6-х міжнародних наукових конференціях.

## **РОЗДІЛ III. МОРФОЛОГІЯ СКУПЧЕНЬ ГАЛАКТИК КАТАЛОГУ PF**

У Розділі III описано результати використання пакету SS для вивчення розподілу галактик у полі скупчень, що мають не менш ніж 100 галактик та для двох додаткових наборів даних. 100 галактик у полі скупчення дають можливість отримувати статистично обґрунтовані результати щодо визначення морфологічного типу скупчень. Після попереднього вивчення, в наборі даних, що досліджується, залишилося 460 скупчень які позбавлені від крайових ефектів. Цей набір для спрощення роботи було поділено відповідно до попередньої оцінки морфологічного типу на 3 групи: відкриті (O), концентровані (C) та проміжної концентрації (I). Також у Розділі III наведено результати, що відносяться до 112 скупчень у багатих областях та до 31 ізольованого скупчення. Проведено порівняння особливостей підструктур в скупченнях основної групі з двома іншими, що знаходяться в областях з екстремальними значеннями щільності.

### **3.1. Морфологія скупчень, що не мають значущої концентрації до центру.**

В основному наборі скупчень, що досліджувалися, знаходилися 254 скупчення каталогу PF, які за попередньою візуальною класифікацією не мали явної концентрації до центру, тип O за схемою Панько [24]. Для такого випадку всі інші можливі регулярні підструктури детектувати простіше, ніж за присутності у полі скупчення області підвищеної концентрації галактик. З урахуванням цього роботу по систематичному вивченню внутрішніх особливостей скупчень галактик каталогу PF було розпочато розсіяних скупчень.



Вже одразу було виявлено, що, крім очікуваних лінійних підструктур, які вперше згадувалися ще в класифікаційній схемі Руда та Састрі [21], в деяких скупченнях зустрічаються більш складні утворення. Саме на цьому наборі скупчень відпрацьовувався алгоритм пошуку хрестів та пів-хрестів з використанням алгоритму **LightHouse Beam** та побудовою відповідної гістограми.

Для кожного з 254 розсіяних скупчень у програмі СС було побудовано карти стандартного розміру 4000"×4000" та проведено аналіз за схемою, що описано у Розділі II. Приклади розсіяних скупчень, без будь-яких особливостей показано на [рис. 3.1а](#). Попередня візуальна оцінка для них підтверджується розподілом щільності галактик по кільцевих зонах (рис. 3.1б).

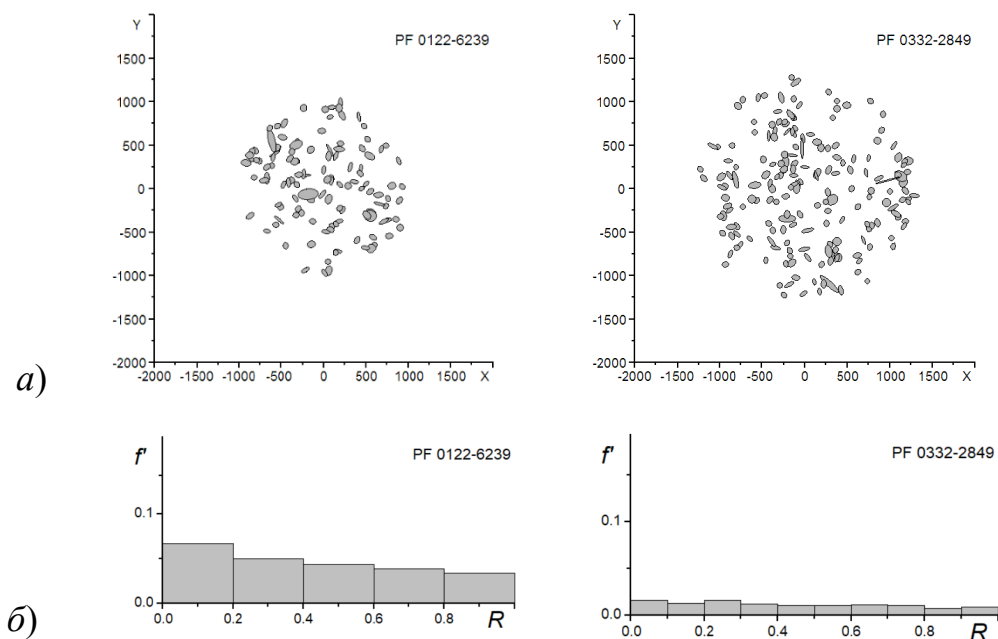


Рис. 3.1. Приклади розсіяних скупчень без ознак підструктур, а), та відповідний розподіл приведеної поверхневої щільності галактик, б): у 5-ти для PF 0122-6239 та у 10-ти кільцевих зонах для PF 0332-2849

Скупчення PF 0122-6239 (RA=1.2252173<sup>h</sup>, Dec.= – 62.380768°, N=120,  $a=1070''$ ,  $b=846''$ ,  $E=0.21$ , PA=125.3°) [рис. 3.1б](#), ліворуч має невеликий тренд до підвищення концентрації до центру, проте перевищення приведеної поверхневої щільності галактик у центральній зоні над іншими не є значущим, тому для скупчення підтверджено попередню класифікацію O.

Скупчення PF 0332-2849 (RA=3.3270302<sup>h</sup>, Dec.= – 28.483573°, N=192,  $a=1286''$ ,  $b=1173''$ ,  $E=0.09$ , PA=112.2°) є чудовим прикладом розсіяного скупчення.

Також, було знайдено, що для розсіяних скупчень більшість галактик знаходиться у межах зоряних величин  $m < m_3 + 3^m$  та різниця між 1-ю та 3-ю за яскравістю галактиками менша за  $1^m$ . Розподіл за зоряними величинами повністю підтверджує припущення, що розсіяні скупчення це початкова, перша еволюційна стадія, коли домінуючі галактики ще не сформувалися. Тим не менш, у розсіяних скупченнях, що мають регулярні підструктури, домінуючі галактики зі значущим перевищенням яскравості над іншими членами скупчення вже з'являються.

Розподіл 254 розсіяних скупчень за підтипами та особливостями міститься у [Таблиці 3.1](#).

Серед набору скупчень, який було проаналізовано, 6 скупчень показали ознаки концентрації до центру, тому їх показано у [Таблиці 3.1](#) окремими рядками. 1 скупчення з 6-х можна віднести до перехідного типу IO (ближчій до I типу) та 5 – до OI. Це може вказувати, що час формування ядра скупчення проміжної концентрації від появи перших ознак до вираженої форми невеликий. В іншому випадку частка скупчень перехідного типу повинна бути більшою.

Скупчень типу O в наборі залишається 248, з яких 62 % не мають підструктур, 24 % мають широку лінійну підструктуру (OL5 – OL7), 8 % – філаментарну підструктуру (OL9 – OL11) та 6 % хрестоподібну. Тобто, серед розсіяних скупчень, що мають підструктури, частка з вузькими лінійними

утвореннями не відрізняється істотно від частки з хрестами, що є перетинами подібних вузьких смуг.

Таблиця 3.1.

Розподіл 254 розсіяних скупчень каталогу PF  
за стандартними типами та ознаками підструктур

Тип	Кількість	З них з особливою роллю яскравих галактик (BG)	З іншими особливостями (P)
O	153	7	33
OL5– OL7	59	6	5
OL9– OL11	21	3	8
OX(Y)	15	5	5
IO	1	-	-
OI	5	-	-
Разом	248+6	21	51

Типові скупчення OL7 (широка смуга) та OL11 (вузька смуга) показано на [рис.3.2](#), а вдалий приклад підструктури типу хрест було наведено у розділі II, [рис. 2.6](#). Напрями полос визначаються програмою CC автоматично і є стійкими: зміна ширини смуги змінює значення її позиційного кута у межах  $\pm 3^\circ$ .

Контраст нормованої щільності між смугою та іншими частинами скупчення є значущий в обох випадках. Візуально у скупченні PF 0360-4072 (RA=3.6032229<sup>h</sup>, Dec.= – 40.717086°, N=109,  $a=975''$ ,  $b=787''$ ,  $E=0.19$ , PA=136.0°, ACO 3140, BM I-II) виділяється широка смуга, у скупченні PF 0066-2617 (RA=0.6654179<sup>h</sup>, Dec.= – 26.16426°, N=201,  $a=1490''$ ,  $b=1185''$ ,  $E=0.2$ , PA=°40.0) навпаки, попередня оцінка не дає впевненості в існуванні підструктури. Це пов'язано з деяким перекриттям зображень галактик для

вибраного масштабу символів. Типовим для скупчень, що мають лінійну підструктуру є співпадіння в межах похибки її напрямку та великої осі скупчення, напрям якої був визначений методом коваріаційного еліпса.

Серед розсіяних скупчень, що не мають регулярних підструктур на кшталт лінійних, хрестів або пів-хрестів, 21 % мають особливості у вигляді надщільних викривлених ланцюжків. Це висвітлюється у розділі IV.

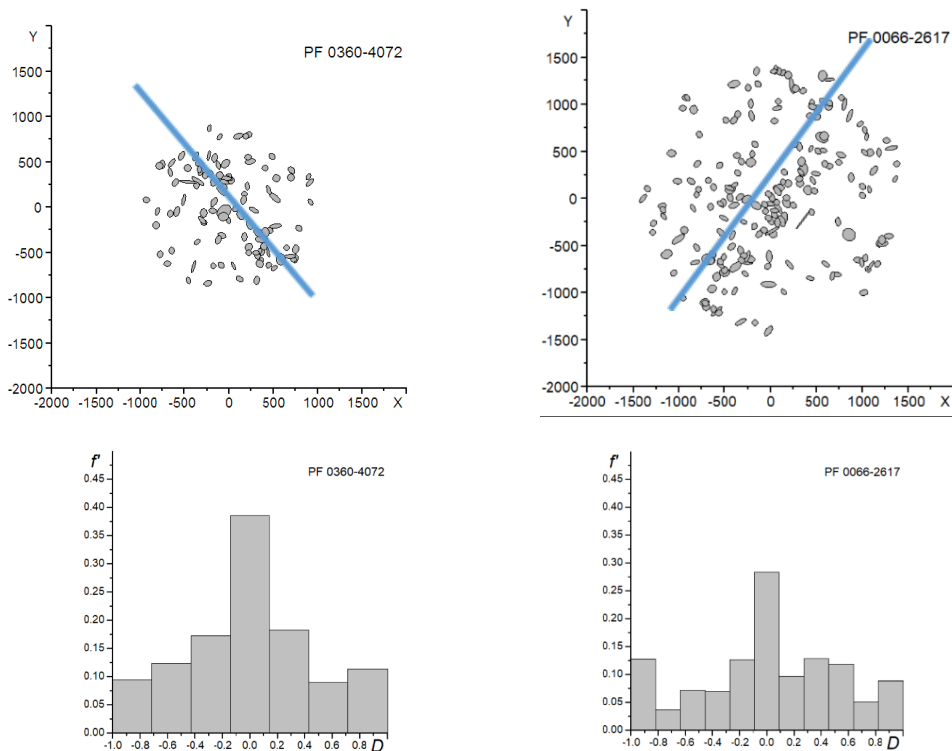


Рис. 3.2. Приклади розсіяних скупчень, що мають лінійні підструктури з відповідними гістограмами, перевищення щільності галактик у смузі є значущим в обох випадках. Напрями полос проілюстровано прямими

### 3.2. Морфологія скупчень проміжної концентрації до центру.

Другий набір даних, що досліджувалися, містить 178 скупчень галактик каталогу PF проміжної концентрації до центру, тип I (Панько [24]) за попередньою оцінкою. Після аналізу за допомогою пакету SS, 2 скупчення

було перекласифіковано та віднесено до типу С, а 24, хоча й мають підвищення концентрації галактик у центрі, є, скоріше, перехідними станами, ОІ та ІО. Це підтверджує, що зміна ступеня концентрації до центру є еволюційним моментом. Зі 176 скупчень 60 (34 %) мають статистично значущі ознаки лінійної підструктури, з них до типу ІL5– ІL7 віднесено 28 скупчень та до ІL9– ІL11 вже 32.

Відносна частка скупчень з вузькими смугами в скупченнях І типу вища відносно скупчень О типу. Дуже незвично, але серед скупчень І типу 4 можна умовно віднести до типу ІсD. Приклад такого скупчення з відповідним розподілом щільності показано на [рис.3.3](#), у центрі знаходиться дуже яскрава еліптична галактика.

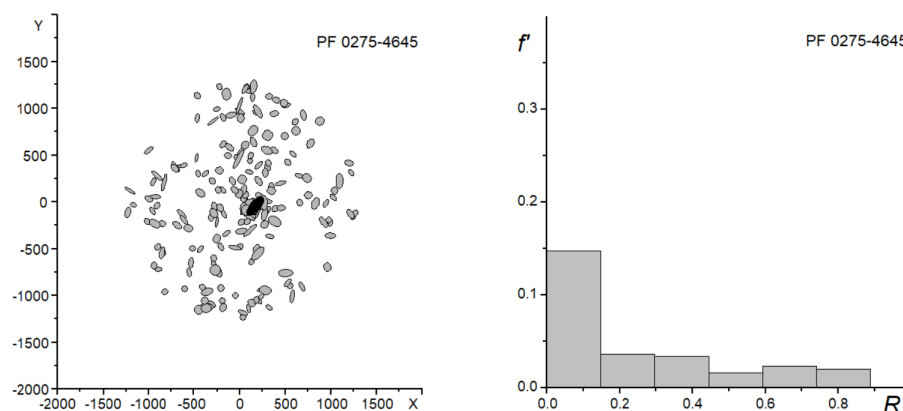


Рис. 3.3. Приклад скупчення з дуже яскравою галактикою у центрі. Розподіл щільності підтверджує тип І

Вважається, що найбільші за масою галактики сD типу зустрічаються тільки у скупченнях великої концентрації до центру. Вони утворюються шляхом злиття/поглинання галактик у області дуже високої об'ємної щільності галактик. Тим не менш, якщо у центрі скупчення проміжної концентрації знаходиться еліптична галактика, зоряна величина якої менша за другу, третю та інші яскраві галактики на  $2^m$ , її вже можна розглядати, як

потенційну cD. Ймовірно, на кінцевій стадії еволюції скупчення ми отримуємо концентроване скупчення, що має класичну cD галактику.

Частка скупчень з філаментарними структурами будь-якого типу, які мають яскраві галактик, пов'язані з такими структурами, вище за аналогічну серед розсіяних скупчень. Якщо порівняти для нашої вибірки підтипи II5–II7 та II9–II11, то ми бачимо ([Таблиця 3.2](#)) зростання кількості яскравих галактик при ущільненні смуги.

Загальний розподіл скупчень проміжної концентрації до центру за їхніми морфологічними особливостями представлено у [Таблиці 3.2](#).

Таблиця 3.2.

Розподіл 178 скупчень каталогу PF  
проміжної концентрації до центру  
за стандартними типами та ознаками підструктур

Тип	Кількість	З них з особливою роллю яскравих галактик (BG або cD?)	З іншими особливостями (P)
I	109	4	11
II5–II7	28	19	12
II9–II11	32	27	-
IX(Y)	9	6	-
Ю	0+24	-	-
ОІ		-	-
С	0+2	1	-
Разом	178-2	57	24

Таким чином, з 178 скупчень проміжної концентрації після детального вивчення 2 було віднесено до С-типу, з 176 інших до II5–II7 віднесено 28 скупчень та до II9–II11 вже 32; хрестоподібні структури знайдено в 9-ти

скупченнях, зустрічаються інші особливості, такі як короткі викривлені щільні ланцюжки. Яскраві галактики підтверджують тенденцію концентруватися до областей підвищеної щільності скупчення.

Кількість скупчень, що мають хрестоподібні особливості у цій групі значно менша: тільки 9, що свідчить про руйнування менш потужного філаменту за час еволюції скупчення від О до І типу. Інші особливості, а саме, короткі та/або щільні ланцюжки було знайдено в 11 скупченнях, вони розглядаються у Розділі IV.

### **3.3. Морфологія концентрованих скупчень.**

Остання група є найменшою, до неї згідно до початкової візуальної оцінки належить тільки 28 скупчень, тип С (Панько [24]). З урахуванням двох перекласифікованих типу І скупчень у подальшому як концентровані було проаналізовано 30 скупчень. Серед них 16 є типовими концентрованими скупченнями з сD галактикою у центрі, ще 8 мають яскраву галактику у центрі, проте різниця у зоряних величинах з іншими галактиками не настільки велика, щоб їх віднести до сD. 9 скупчень мають ознаки широкої смуги підвищеної концентрації L5 – L7, та 7 скупчень мають інші особливості, наприклад, одне з найбільших за кутовим розміром скупчень PF 0068-2875 має 2 центри концентрації та викривлену коротку смугу, що зв'язана з одним з центрів концентрації. Вузькі смуги L9 – L11 у концентрованих скупченнях не було виявлено.

Загальний розподіл концентрованих скупчень за їхніми морфологічними особливостями дано у [Таблиці 3.3.](#)

Таблиця 3.3.

Розподіл 30 концентрованих скупчень каталогу PF  
за стандартними типами та ознаками підструктур

Тип	Кількість	З них мають домінуючу галактику (сD) у центрі	З них з особливою роллю яскравих галактик (BG)	З іншими особливостя ми (P)
C	16	16	-	1
CL5– CL7	9	-	9	7
CX(Y)	5	-	5	
Разом	28+2	16	14	8

На [рис. 3.4](#) показано скупчення типу C, в якому яскраві галактики розташовано випадково (*a*), типове C сD скупчення (*b*), та скупчення з Y-подібною особливістю та сD галактикою у центрі (*в*). Для останнього випадку, крім гістограми розподілу поверхневої густини галактик у кільцевих зонах, показана гістограма, за якою детектовано найпотужнішу частину Y-подібної структури. Напрями смуг Y-подібної структури на рис. 3.4 вказано стрілками.

Скупчення PF 0275-4645 ([рис. 2.8](#), Розділ II), що відноситься ще до проміжного I типу, відрізняється від скупчення PF 0260-1938 тільки висотою центрального піку у розподілі поверхневої густини галактик. Це не унікальний випадок, такі скупчення можна розглядати ілюстрацію послідовних стадій еволюції.



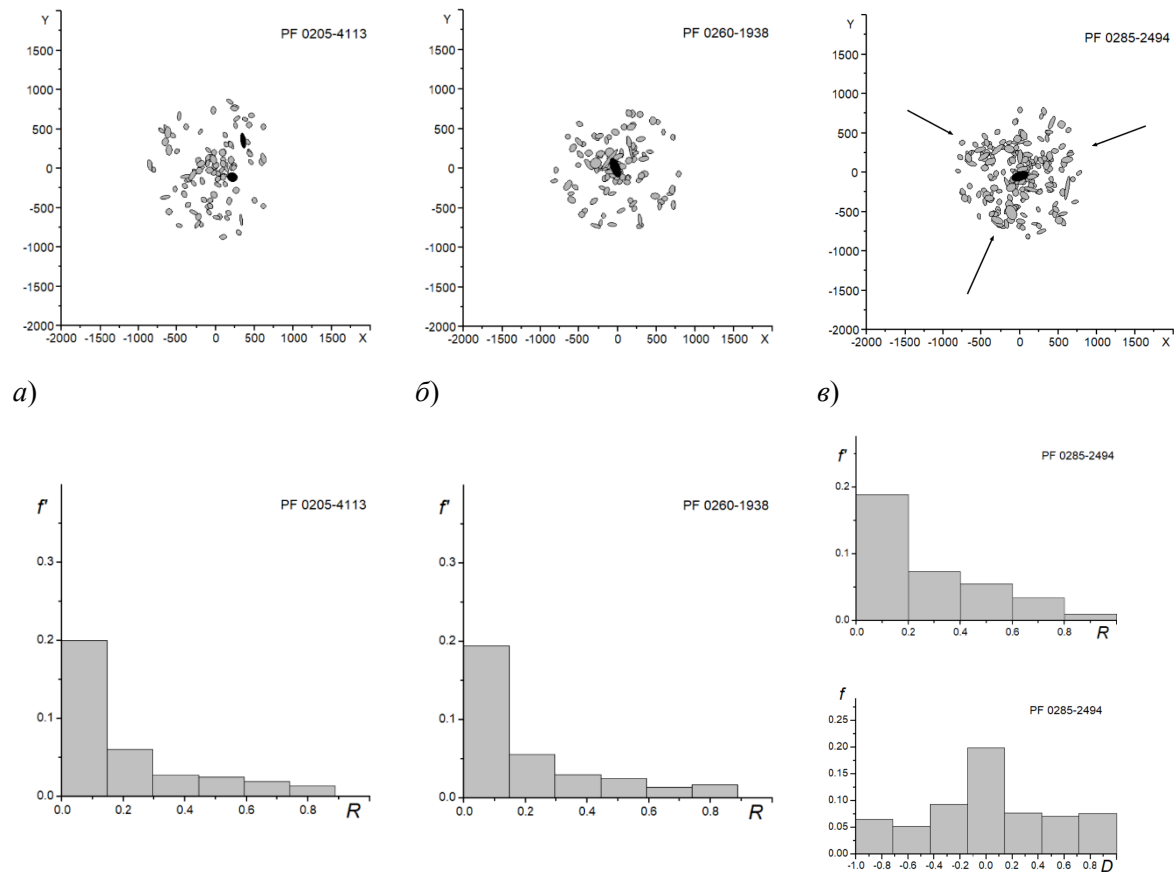


Рис. 3.4. Приклади скупчень С типу, карти та відповідні розподіли щільності: *а)* концентроване скупчення без яскравої домінуючої галактики С; *б)* типове С sD скупчення; *в)* скупчення типу С sD з Y-подібною підструктурою, тобто СsDY

Група концентрованих скупчень, найменша за загальною кількістю об'єктів, демонструє, що деякі особливості зберігаються протягом усього часу еволюції. Лінійні та хрестоподібні підструктури у концентрованих скупченнях широкі, це наводить на думку, що вузькі особливості підтягуються до центру, та додатково збагачують його галактиками.

### 3.4. Скупчення галактик у багатих областях.

Як додатковий спостережний матеріал для дослідження впливу найближчих сусідів було обрано 112 скупчень галактик, що утворюють

структури більш високого рівня, тобто надскупчення. Перелік таких скупчень було отримано та описано Панько в роботах [70, 71]. При створенні списку скупчень, що утворюють надскупчення, приймалися до уваги такі, що мали 50 та більше галактик. Частка цих 112 скупчень (що містять 100 та більше галактик) вже розглядалася.

Для визначення таких скупчень було використано визначення відстаней до скупчень за калібрувальним співвідношенням, рівняння 2.3. Далі для кожного скупчення було знайдено відстань у тривимірному просторі до найближчого сусіда. Розподіл відстаней до найближчого сусіда для початкового набору скупчень показано на [рис. 3.5](#). Після цього методом *friend-of-friend* відшукувалися наступні найближчі сусіди, допоки відстань до нового члена надскупчення не перетинала межове значення [70, 71]. Частина скупчень, які було відібрано, як такі, що утворюють надскупчення, на [рис. 3.5](#) розташована у лівій частині розподілу.

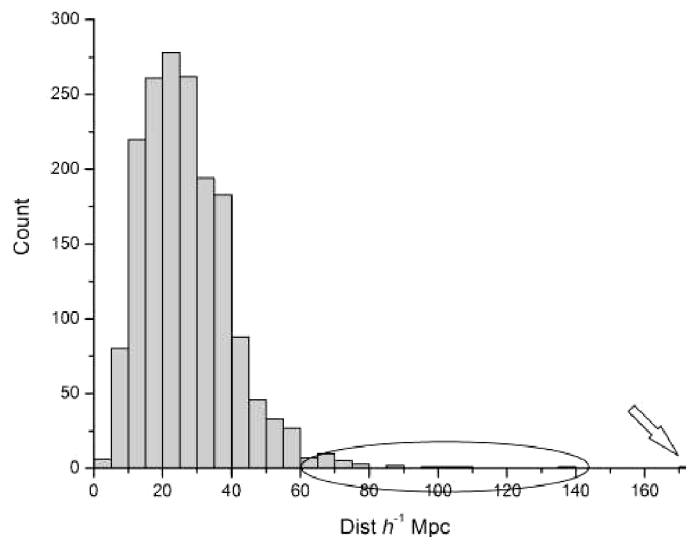


Рис. 3.5. Розподіл відстаней до найближчого сусіда для скупчень каталогу PF, що мають 50 та більше скупчень. Ізольовані скупчення обведено, стрілкою показано скупчення поблизу межі каталогу

112 скупчень галактик першого додаткового набору даних входять до 19 надскупчень з кратністю від 5 до 9 скупчень у кожному, мають відстань до найближчого сусіда не більше, ніж  $D_{\text{lim}} = 24 h^{-1} \text{Mpc}$  та налічують 50 та більше галактик у полі скупчення. При цьому для невеликої частини скупчень мінімальна відстань до сусіда становить  $4.5 h^{-1} \text{Mpc}$ . Всі скупчення з цього набору даних відносяться до близьких, з червоними зміщеннями не більше 0.16.

Великі маси, що розташовані поблизу скупчення, повинні спотворювати простий шлях його еволюції від розсіяного до концентрованого. Це припущення підтверджується результатами дисертаційного дослідження. Вплив сусідів можна побачити, наприклад у напрямках підструктур у надскупченні SC1 232-44 ( $z=0.090$ ), яке об'єднує 5 скупчень та налічує приблизно 350 галактик (рис. 3.6). Форма надскупчення у наближенні тривісного еліпсоїда має наступне відношення осей  $10 : 2.6 : 0.2$ . Надскупчення майже пласке та витягнуте. 4 члени надскупчення утворюють компактну його частину, 1 скупчення віддалене.

З 112 скупчень, що входять до структур вищого порядку (надскупчень), 8 відноситься до типу С, 71 відноситься до проміжного за концентрацією до центру типу І та 33 до розсіяного типу О. Всі концентровані скупчення у надскупченнях мають найяскравішу галактику у центрі.

У порівнянні з базовим набором ми спостерігаємо істотне перевищення скупчень типу І. Третина із 112, а саме 40 скупчень, мають регулярні підструктури попри те, що 36 з них є скупченнями І-типу. Тобто у надскупченнях половина скупчень проміжної концентрації (36 з 71) мають підструктури, що знову значно перевищує аналогічне співвідношення для першого набору. Яскраві галактики чітко концентруються до підструктур. Напрями лінійних та хрестоподібних підструктур зазвичай пов'язані з напрямками на сусідні скупчення (рис. 3.6), що можна розглядати як відображення сітки філаментів DM.

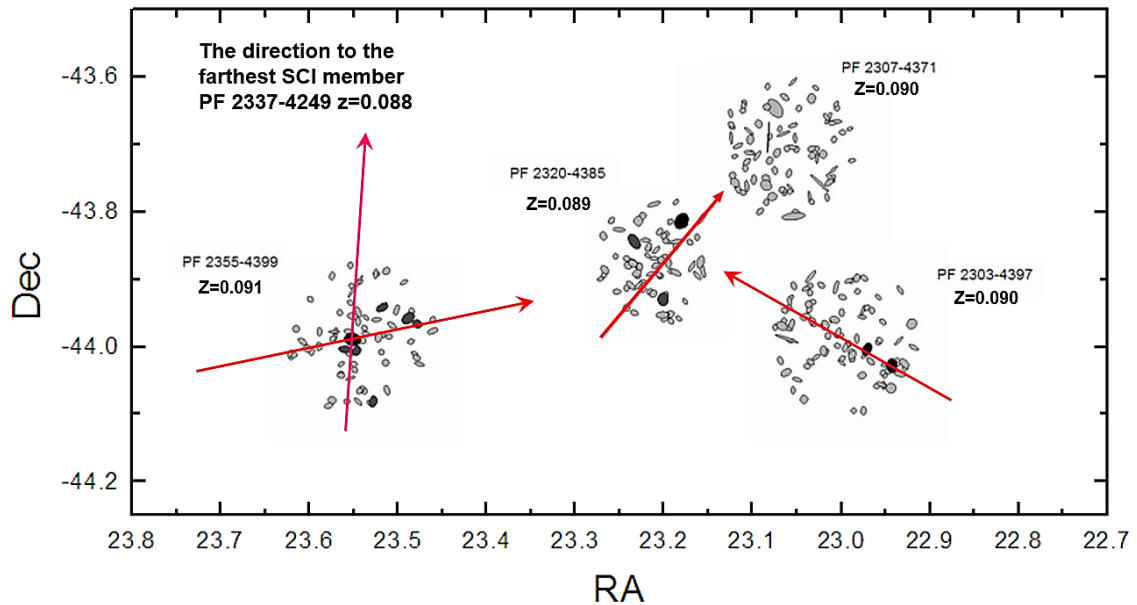


Рис.3.6. Напрями філаментарних особливостей у SCI 232-44. Скупчення галактик показано не в масштабі. Віддалене скупчення PF 2337-4249 не показано

Ще однією особливістю морфології скупчень у багатих областях є невелика різниця у ступенях концентрації до центру для скупчень, що належать до одного надскупчення. На [рис. 3.6](#) це також добре видно, всі скупчення у надскупченні є розсіяними.

### 3.5. Ізольовані скупчення галактик.

Останній набір, що аналізувався, це ізольовані скупчення. При розрахунку відстаней до найближчого сусіда на відповідній гістограмі виділяються скупчення, відстані до яких виходять за межі  $3\sigma$  від найбільш вірогідного значення ([рис. 3.5](#)), процедуру описано у [72]. Такі скупчення можна вважати ізольованими. Цей матеріал є дуже важливим для порівняння стадій еволюції скупчень у різному оточенні. Ізольовані скупчення завдяки віддаленню від великих мас, повинні проходити стадії еволюції у

найпростіший спосіб або просто концентруючись до центру зі зміною типу  $O \Rightarrow I \Rightarrow C$ , або стискаючись до філаментів підстилаючої сітки DM.

У набір ізольованих скупчень було включено 32 з них, що на гістограмі розподілу відстаней до найближчого сусіда попадають у межі більше, ніж  $60h^{-1}$  Mpc (на [рис. 3.5](#) обведено еліпсом). Додатково було перевірено наявність поблизу цих скупчень менших об'єктів каталогу PF (груп галактик).

Обрані 32 скупчення не мають у межах  $60h^{-1}$ Mpc жодного іншого скупчення або групи галактик, вони дійсно є ізольованими. Одне скупчення, PF 0540-5764, що має найбільшу відстань до найближчого сусіда ( $173.7h^{-1}$ Mpc, на [рис. 3.5](#) вказано стрілкою) було виключено з розгляду. Воно розташовано поблизу межі регіону, який спостерігався у MRSS, й немає впевненості, що воно дійсно є ізольованим. Тобто, останній набір даних містить 31 ізольоване скупчення галактик із багатством 50 і більше галактик у полі скупчення.

У цьому наборі, як і у попередніх випадках, не всі скупчення мають аналоги в інших каталогах. Для 31 скупчення тільки 9 мають аналоги у каталозі ACO [19] та всього 4 – з каталогом APM [69]. Це пов'язано з більшою глибиною каталогу MRSS [60], який є базовим спостережним матеріалом даного дослідження.

Лише 5 скупчень набору належать до скупчень з  $N > 100$ , тоді як інші містять від 50 до 88 галактик у скупченні. Основна частина наших ізольованих скупчень (19), містять від 50 до 60 галактик. 22 ізольованих скупчення мають червоні зміщення, що не перевищують 0.15. Результат аналізу розподілу галактик у полі скупчення підсумовано у [Таблиці 3.4](#).

Як видно з [Таблиці 3.4](#), більшість з ізольованих скупчень, а саме, 25, є розсіяними, причому особливості мають тільки 4 з них. Скупчення концентрованого типу C є тільки 1, а проміжного типу I всього 5, з яких тільки 1 не має підструктур. Це дає підстави для висновку, що ізольовані

скупчення формуються та просуваються по стадіям еволюції повільніше, ніж інші. Області, в яких вони виникають є найменш щільними відносно всього масиву скупчень, й все це повністю збігається з припущенням щодо початкової стадії формування скупчень.

Таблиця 3.4

## Морфологічні типи ізольованих скупчень

№	PF	R.A.	Dec.	N	zest	Dist ( $h^{-1}$ Mpc)	Panko type	ACO	APM
1	0016-5711	0.1670739	-57.107367	88	0.053	68.9	IL7	2731	-
2	0024-2431	0.2472369	-24.300611	52	0.129	78.5	O <sup>1</sup>	-	-
3	0093-3597	0.9354548	-35.969931	51	0.121	62.7	O	-	-
4	0096-3921	0.9621619	-39.205838	52	0.142	136.9	O	-	-
5	0115-4600	1.1567254	-45.996573	261	0.04	105.4	O	2877	147
6	0145-2632	1.4517246	-26.313951	51	0.13	60.1	O	-	-
7	0200-2252	2.0036788	-22.519040	52	0.133	73.0	O	S 213	-
8	0240-4218	2.4023855	-42.175194	56	0.14	98.3	O	3014	-
9	0294-2398	2.9476380	-23.972509	52	0.131	64.0	O	-	-
10	0303-4097	3.0337096	-40.962828	53	0.127	60.5	O <sup>2</sup>	3081	-
11	0341-3468	3.4138816	-34.671654	50	0.118	60.0	I	-	-
12	0358-6952	3.5873377	-69.511811	53	0.126	68.8	O	-	-
13	0375-7764	3.7591708	-77.637521	54	0.126	67.4	OY	-	-
14	0381-1788	3.8163216	-17.879863	282	0.069	73.5	O	464	-
15	0397-6046	3.9736611	-60.450522	75	0.115	71.4	O	-	-
16	0413-3091	4.1336041	-30.907580	271	0.064	77.0	IP <sup>3</sup>	3223	484
17	0444-3673	4.4464843	-36.724158	56	0.133	101.0	O	-	-
18	0449-2638	4.4987465	-26.377217	54	0.124	68.9	C	495	503
19	0450-6452	4.5014199	-64.516471	59	0.118	71.4	O	-	-
20	0501-3610	5.0177646	-36.090484	61	0.123	78.0	O	-	-
21	2104-4422	21.0417124	-44.215199	56	0.123	66.8	O	-	-
22	2114-3750	21.1438407	-37.493762	55	0.127	69.0	OL7 <sup>4</sup>	-	-
23	2169-2686	21.6904909	-26.851294	57	0.130	65.4	O	-	-
24	2175-1751	21.7500206	-17.503100	79	0.125	87.4	O	-	-
25	2188-7165	21.8810032	-71.642227	102	0.062	64.3	O <sup>5</sup>	-	-
26	2190-6118	21.9097413	-61.171245	58	0.119	73.1	O <sup>6</sup>	-	-
27	2195-7771	21.9567135	-77.709296	50	0.144	89.1	OX	-	-
28	2199-2391	21.9915162	-23.900561	70	0.109	62.6	IL5 <sup>7</sup>	-	-
29	2204-7192	22.0482039	-71.910053	262	0.051	67.4	O	-	-
30	2303-5721	23.0319804	-57.207073	70	0.119	65.4	IL11	-	-
31	2380-3628	23.8044115	-36.274714	65	0.126	69.7	O <sup>8</sup>	cs	15

У [Таблиці 3.2](#) примітками вказано особливості наступних скупчень:

<sup>1</sup> PF 0024-2431, витягнуте скупчення з  $E=0.39$ ;

<sup>2</sup> PF 0303-4097, незначуща концентрація до центру, припустима класифікація I?O;

<sup>3</sup> PF 0413-3091, подвійне ядро;

<sup>4</sup> PF 2114-3750, компактний ланцюжок, що містить 23 галактики;

<sup>5</sup> PF 2188-7165, скупчення, багате на дискові галактики;

<sup>6</sup> PF 2190-6118, витягнуте скупчення з  $E=0.30$ ;

<sup>7</sup> PF 2199-2391, компактна лінійна підструктура, що містить 24 галактики, скупчення, багате на дискові галактики;

<sup>8</sup> PF 2380-3628, викривлений компактний ланцюжок.

Цікаво, що два витягнутих скупчення, PF 0024-2431 та PF 2190-6118 (еліптичність 0.39 та 0.30 відповідно) є чисто розсіяними скупченнями з рівномірним розподілом галактик. Їх можна розглядати, як скупчення, що утворюються вздовж широкого філаменту DM з невеликим контрастом густини. Компактні ланцюжки, навпаки, вказують на вузькі філаменти DM з великим контрастом густини.

Загальний результат щодо скупчень проміжної концентрації з останнього набору свідчить, що вони формуються під впливом досить потужного філаменту DM. Лінійні утворення цих скупчень відображають саме напрям філаменту, а центральне ущільнення вказує на проміжну еволюційну стадію. Єдине компактне скупчення має дуже високу концентрацію до центру з яскравою галактикою у центрі. Його з відповідною гістограмою показано на [рис. 3.7](#), ліворуч.

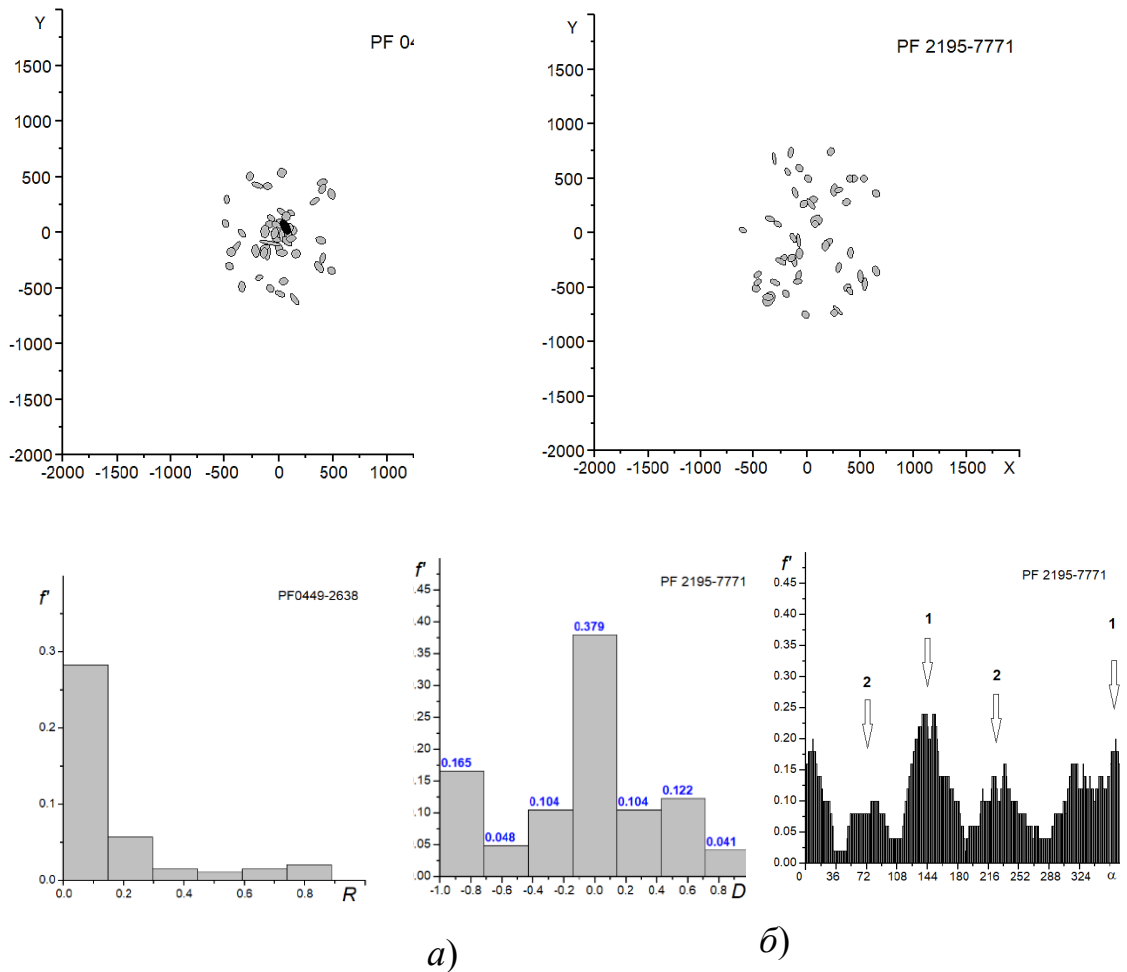


Рис. 3.7. Приклади скупчень на фінальній стадії еволюції (ліворуч), та на початковій

У скупченні PF 0449-2638 різниця між найяскравішою галактикою та двома наступними за яскравістю невелика: їхні зоряні величини становлять:  $15.74^m$ ,  $16.51^m$  та  $16.83^m$ . Наступна за яскравістю галактика вже має зоряну величину  $17.06^m$ . Тобто для скупчення PF 0449-2638 еволюційний статус є: завершальна стадія, скупчення сформоване, центральна домінуюча галактика у стані формування.

На [рис. 3.7](#), праворуч показано скупчення PF 2195-7771, що знаходиться на початковій стадії: воно не має а ні концентрації до центру, а ні особливим чином розташованої яскравої галактики, проте навіть просто оком видно хрестоподібну структуру. Її достовірність підтверджується



розподілами густини: [рис. 3.7, а\)](#) – по смугах, [рис. 3.7, б\)](#) на **LightHouse Beam** діаграмі. Більш потужна смуга 1 відповідає розподілу по смугах, менш потужна 2 також має два значущих піка розподілу. Про скупчення PF 2195-7771 можна зробити висновок, що воно почало формуватися на перетині філаментів, кожний з яких відповідає сторонам хрестоподібної особливості. У подальшій еволюції більш потужний елемент (позначено цифрою 1 на гістограмі) повинен зберігатися, ймовірно за все, скупчення перетвориться на проміжне з лінійною підструктурою (тип II7).

Присутність скупчень галактик різної внутрішньої будови серед ізольованих підтверджує, що процес формування скупчень відбувається з різними швидкостями. За червоними зміщеннями 31 скупчення розділяється на 2 групи: за зміщеннями у межах 0.04 – 0.069 та у межах 0.109 – 0.144. Скупчення, що мають внутрішні підструктури, присутні в обох групах. Концентроване скупчення з червоним зміщенням  $z=0.124$  належить до другої групи. Це означає, що на невеликих червоних зміщеннях немає зв'язку між еволюційною стадією скупчення та його відстанню.

### **3.6. Особливості концентрації до центру кожного з наборів даних.**

При виконанні дисертаційного дослідження було проаналізовано 460 скупчень галактик, що мають 100 та більше галактик у полі скупчення, 112 скупчень у багатих областях та 31 ізольоване скупчення. Аналіз проводився за єдиною методикою. Однак, співвідношення скупчень різних типів у різних наборах має істотну різницю. Для першого набору, в якому розглядалися скупчення з  $N \geq 100$ , без урахування оточення, співвідношення типів за концентрацією до центру  $C : I : O \in 1 : 6 : 9$ , (I тип 38%). Для скупчень у надскупченнях до проміжного типу відноситься більше половини скупчень, 71 з 112 (I тип 63%), для ізольованих скупчень частка розсіяних скупчень є переважною: 25 з 31 (тип O 80%), а скупчення проміжної концентрації становлять тільки 16%.

Першій набір можна розглядати, як базовий, більша частина скупчень в ньому немає близьких сусідів, й не є жорстко ізольованими. Велику частку скупчень проміжної концентрації при наявності близьких сусідів можна пояснити гравітаційним впливом розташованих поруч великих мас, що уповільнює швидкість стискання.

Для ізольованих скупчень головним чином ми маємо справу із скупченнями на початковій стадії формування. Ізольовані скупчення взагалі формуються в областях невеликої густини та низького контрасту густини DM, як витікає з теоретичних робіт та комп'ютерних симуляцій (Розділ I). Процес стискання тому йде повільно, лінійні особливості також формуються у невеликій частці ізольованих скупчень.

Отримані результати свідчать, що обмежуватися двома шляхами еволюції скупчень галактик не варто: найпростіший шлях це просто зростання концентрації до центру, наступний за вірогідністю – утворення лінійної підструктури, напрям якої залежить від розподілу темної матерії. Як показують розподіли скупчень за типами, вузькі лінійні підструктури, що присутні у скупченнях проміжного типу, при зростанні концентрації до центру зникають – стягуються до центру. При цьому широкі смуги зберігаються, цей факт вимагає дослідження.

Останній, досить рідкісний шлях еволюції, пов'язан з філаменатами, що перетинаються. Еволюція таких підструктур проходить шляхом руйнування менш потужної частини, при цьому може виникнути викривлений ланцюжок галактик.

Щільні смуги, хрести, пів-хрести, складні ланцюжки присутні у скупченнях всіх трьох наборів. Вони обговорюються у наступному розділі.

### 3.7. Основні результати за розділом III.

За допомогою пакету СС було вивчено особливості розподілу галактик більш, ніж для 550 скупчень галактик. Окремо розглядалися скупчення трьох різних наборів:

- 1) 460 скупчень, що налічують 100 та більше галактик у полі скупчення (базовий набір);
- 2) 112 скупчень, що знаходяться у багатих областях, тобто належать до надскупчень з кількістю членів від 5 до 9 та мають найближчого сусіда на відстані, що не перевищує  $24 h^{-1}$  Мрс;
- 3) 31 ізольоване скупчення з найближчим сусідом на відстані не менш, ніж  $60h^{-1}$  Мрс.

Було показано, що в областях підвищеної щільності частка скупчень проміжної концентрації значно перебільшує аналогічну для основної групи, а саме, 63% проти 38%. Це пояснюється впливом розташованих поруч великих мас у щільних областях надскупчень. У той же час серед ізольованих скупчень більша частка відноситься до розсіяних.

У всіх наборах даних, у скупченнях, крім лінійних підструктур різної ширини, було знайдено регулярні утворення інших типів, причому ці структури як типові знайдено вперше. До регулярних підструктур ми віднесли хрести та пів-хрести, що розглядаються, як відображення відповідно перетинів та примикань філаментів підстилаючої сітки темної матерії.

Інший тип підструктур, короткі щільні викривлені ланцюжки також є статистично значущими. Вони потребують окремого індивідуального вивчення.

Спеціальної уваги аналізу розподілу еліптичності галактик у скупченнях не приділялося, хоча програма СС дозволяє це виконувати.

В роботі не було виявлено кореляції між морфологічним типом скупчення та його фотометричним (оціненим) червоним зміщенням. Це можна віднести до невеликих червоних зміщень скупчень каталогу PF.

Методика, яку було відпрацьовано при виконанні дисертаційного дослідження, може бути використана на іншому спостережному матеріалі, який дозволить знайти або підтвердити зв'язок морфологічного типу з відстанню, тобто з часом, оскільки формування скупчень продовжується відповідно до загальної еволюції великомасштабної структури Всесвіту.

Результати, що викладено у Розділі III свідчать, що обмежуватися двома шляхами еволюції скупчень галактик не варто: найпростіший шлях це просто зростання концентрації до центру, наступний за вірогідністю – утворення лінійної підструктури, напрям якої залежить від розподілу темної матерії. При найрідкіснішому варіанті спочатку йде формування хрестів/пів-хрестів, якщо скупчення виникає на перетині філаментів темної матерії. В останньому випадку в ході подальшого стискання підвищена концентрація галактики зберігається вздовж більш потужного волокна, та виникає лінійна підструктура, можливо, викривлена.

Всі задачі Розділу III виконано у повному обсязі. Результати, що обговорюються у Розділі III, опубліковано у статтях [A1](#), [A2](#), [A3](#), а також додаткових публікаціях [A18](#), [A19](#), [A20](#). Також результати опубліковано у тезах конференцій [A7 – A14](#), [A16](#) та обговорювалося на 7-х міжнародних наукових конференціях.

## РОЗДІЛ IV. РЕГУЛЯРНІ ПІДСТРУКТУРИ СКЛАДНОЇ ФОРМИ У СКУПЧЕННЯХ ГАЛАКТИК КАТАЛОГУ PF

Під час виконання дисертаційного дослідження було знайдено нові додаткові типи регулярних підструктур, проаналізовано особливості орієнтацій галактик у них, та доведено, що ці нові типи регулярних підструктур не є унікальними утвореннями, а відображають різні етапи еволюції скупчень та/або вплив найближчих сусідів й підстилаючої сітки DM. Саме цьому присвячено Розділ IV.

### 4.1. Філаментарні підструктури та щільні смуги.

Смуги підвищеної щільності, що детектуються не менш, ніж в 20% скупчень можуть бути маркерами підстилаючих філаментів DM або, у деяких випадках, проекцією стіни DM на картинну площину. Тому особливий інтерес представляють орієнтації та еліптичність зображень галактик. Переважні орієнтації великої осі проекції галактик на картинну площину або вирівнювання галактик свідчать про фізичні процеси, що протікають під час їхнього формування та пізніше.

Ще один фактор, що впливає на орієнтації та еліптичність зображень галактик, є ефект гравітаційного лінзування.

Відомо, що еліптичні cD галактики мають подібні форми й орієнтацію, як і гало темної матерії, що лежить в їх основі [73]. Для скупчень каталогу PF вирівнювання cD галактик відносно батьківського скупчення також підтверджується [58]. Важливість вивчення орієнтацій або вирівнювання галактик підкреслено в огляді [74].

На [рис. 4.1](#) наведено типові приклади хрестоподібних підструктур на яких видно розташування та вирівнювання яскравих галактик. Так, для скупчення PF 0020-4224, найяскравіша галактика має досить велику

еліптичність  $E = 0.53$ . Це означає, що її позиційний кут  $PA = 109^\circ$  визначається з невеликою помилкою, яка не перевищує  $5^\circ$ . При цьому позиційний кут більш потужної лінії хресту визначається програмою *CS* у межах  $108^\circ - 111^\circ$  в залежності від обраної ширини зони. Для скупчення *PF 0020-4224* ми маємо результат – чітко виражене вирівнювання центральної яскравої галактики відносно більш потужної лінії хрестоподібної структури. Інша її лінія є викривленою, її існування підтверджується **LightHouse Beam** діаграмою. Найяскравіша галактика міститься на перетині ліній хреста. Можна стверджувати, що це розсіяне скупчення галактик формується на перетині філаментів, причому максимальний контраст густини *DM* припадає на вузол, де сформувалася наймасивніша центральна галактика.

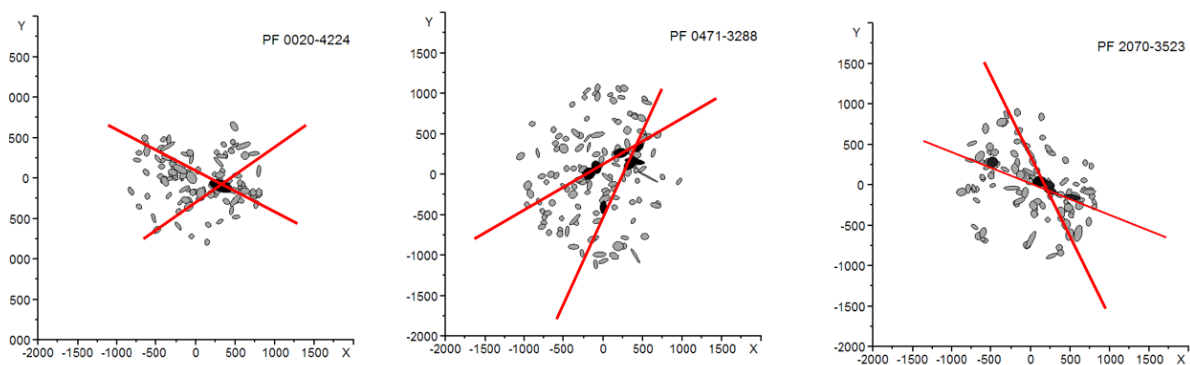


Рис. 4.1. Приклади хрестоподібних структур у скупченнях. Статистично значущі ущільнення підкреслено червоним. Розташування та вирівнювання найяскравіших галактик є типовим для таких підструктур

Подальша еволюція внутрішньої будови цього скупчення, найбільш ймовірно, матиме наступний вигляд: мігрування галактик до більш потужної лінії хреста, утворення широкої смуги з центральним згущенням, стискання до вузької смуги з потовщенням, як проміжного моменту до утворення сферично симетричного скупчення концентрованого типу. При значенні

$E = 0.53$  центральна галактика ще може відноситися до еліптичних, хоча найвірогідніше значення еліптичності для таких галактик знаходиться у межах 0.2 – 0.3. Вона повинна наприкінці перетворитися у типову cD галактику.

Подібні ж результати отримано для інших скупчень, два з яких також показано на [рис. 4.1](#). Зображення яскравих галактик орієнтовані вздовж виділених ліній.

Інший варіант вирівнювання було знайдено у скупченні PF 0368-4570 ([рис. 4.2](#)). Це скупчення проміжної концентрації. Обидва філаменти, що утворюють хрест, було знайдено без урахування галактик центрального згущення, оскільки такий варіант аналізу передбачено у програмі СС. Достовірність сторін хреста підтверджується розподілами. Яскрава галактика знову знаходиться у центрі хреста, однак її позиційний кут близький до напрямку менш потужної лінії.

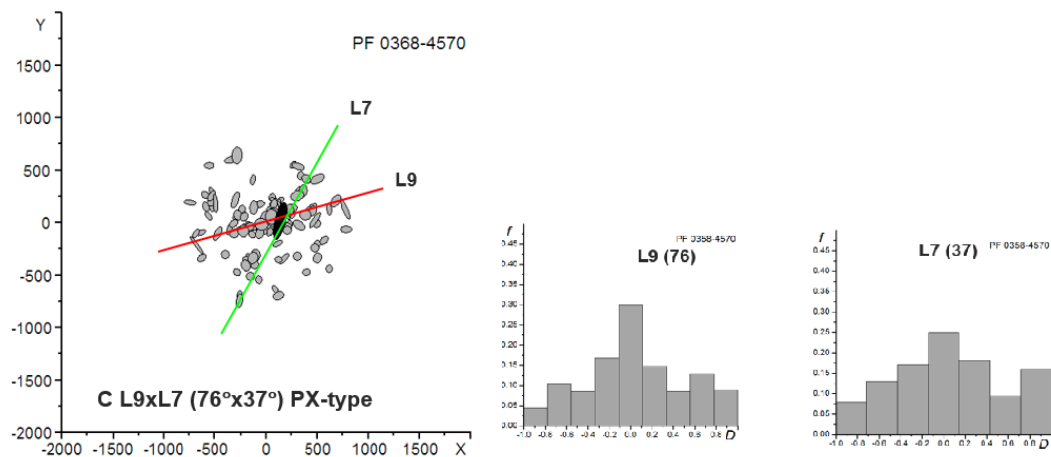


Рис. 4.2. Хрестоподібна структура у скупченні PF 0368-4570. Статистично значущі ущільнення показано кольоровими лініями. Найяскравіша галактика вирівнюється за напрямом менш потужної лінії хреста

Вирівнювання галактик вздовж філаментарних утворень у скупченнях повністю відповідає описаному у роботі [74]. Таке вирівнювання було отримано як результат моделювання. У тривимірному випадку еліптичні галактики у наближенні тривісного еліпсоїду показують вирівнювання великої осі вздовж філаменту. Дисккові галактики показують вирівнювання осі обертання перпендикулярно до напрямку філаменту. У проекції на картинну площину для філаменту буде спостерігатися вирівнювання зображень галактик вздовж лінійної підструктури. Ця тенденція вирівнювання справедлива лише для масивних, тобто яскравих, галактик. Менш масивні галактики показують вирівнювання на найближчу масивну галактику.

У тій же роботі детально описано результат моделювання вирівнювання масивних галактик у стінах або стінках войдів. Еліптичні галактики для таких елементів великомасштабної структури мають тенденцію вирівнювати свої головні осі перпендикулярно радіус-вектору від центру войду, тобто вздовж стіни. Дисккові галактики навпаки вирівнюють в цьому напрямку осі свого обертання. Це підтверджено спостережними роботами, наприклад [75]. У двовимірному випадку ми очікуємо вирівнювання великих осей зображення еліптичних галактик до перпендикуляру до щільної смуги, яка є проекцією стіни на картинну площину. Звісно, такий варіант проекції стіни – вздовж променя зору – є рідкісний. В нашому великому наборі даних знайшлися тільки два таких випадки (рис. 4.3).

Скупчення PF 2086-5271 взагалі є дуже незвичайним та потребує окремого детального вивчення. Можливо, воно формується на перетині стін або стіни та філаменту, що примикає. Скупчення багате на дисккові галактики. В ньому 29 % галактик мають еліптичності більше ніж 0.5. На карті добре видно, що великі осі проекцій менших дисккових галактик, що не входять до лінійної підструктури, направлено на масивні галактики. Це також типова ситуація для вирівнювання менш масивних галактик відносно більш масивних [74].



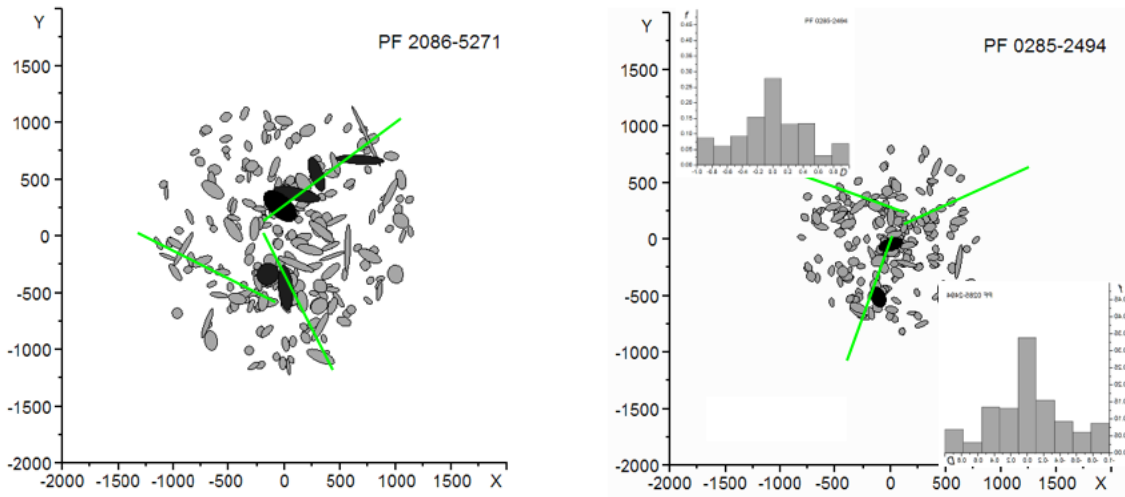


Рис. 4.3. Складні підструктури та вирівнювання галактик перпендикулярно напрямку підструктури (підкреслено лініями)

Ще складніші утворення відносяться до ланцюжків, приклади яких показано на [рис. 4.4](#).

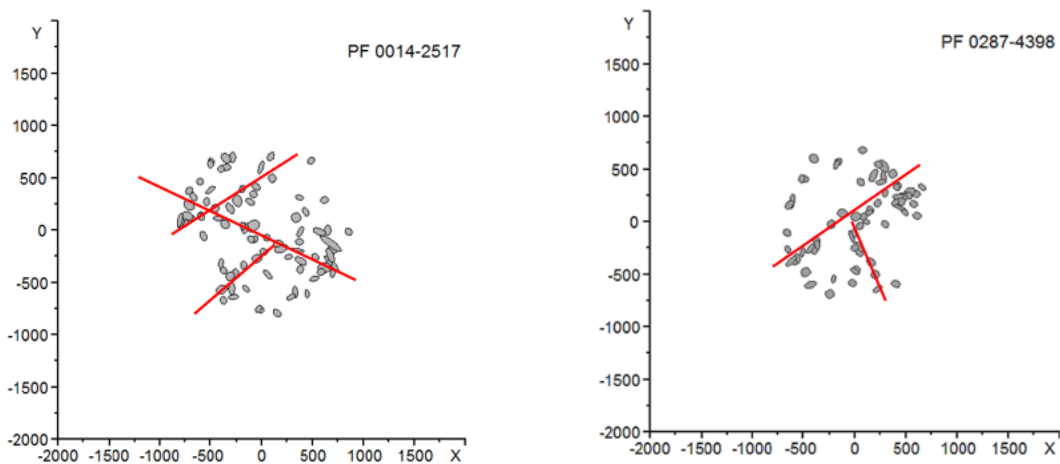


Рис. 4.4. Складні ланцюжки, що відображають філаменти низької щільності

Структури такого типу у літературі не описано. Всі галактики в них відповідно до каталогу MRSS слабші за  $16^m$ , більшість галактик має невелику

еліптичність, що ускладнює загальну оцінку їхнього ймовірного вирівнювання. Проте, існування ланцюжків не викликає сумніву.

#### **4.2. Викривлені та щільні ланцюжки. Особливості орієнтацій.**

Викривлені або щільні ланцюжки галактик у скупченнях, які було знайдено у дисертаційному дослідженні, є специфічними утвореннями. Це фізичні утворення, зазвичай лінійні. Щільність галактик в них значно перевищує середню по скупченню. З урахуванням контрасту щільності, який використовувався при створенні каталогу PF, їхня щільність ще на порядок перевищує щільність галактик фону.

Як правило, у знайдених ланцюжках міститься від 10 до 60 галактик вздовж викривленої або прямої дуже вузької лінії. Прямі ланцюжки відрізняються від лінійних підструктур довжиною, вони менші за розмір самого скупчення. Приклад викривленого ланцюжку наведено на [рис. 4.4](#), ліворуч, скупчення PF 0287-4308. У скупченні на практично не заповненому полі чітко видно Y-подібне злиття філаментів. Всі галактики у цьому ланцюжку мають майже однакові зоряні величини, галактики з великою еліптичністю показують вирівнювання вздовж ланцюжка, як у філаментах.

В іншому випадку у скупченні PF 0035-3990 у ланцюжку об'єднано 32 з 144 галактик ([рис. 4.5](#)). Ланцюжок у більшому масштабі показано на лівій панелі, де видно, що галактики показують два типи вирівнювання – як вздовж, так і перпендикулярно напрямку ланцюжка. Вздовж ланцюжка вирівнюється 18 галактик, поперек – 10, та 5 не показують значущого вирівнювання. Вважаємо, що це скупчення та окремо ланцюжок потребують подальшого вивчення.

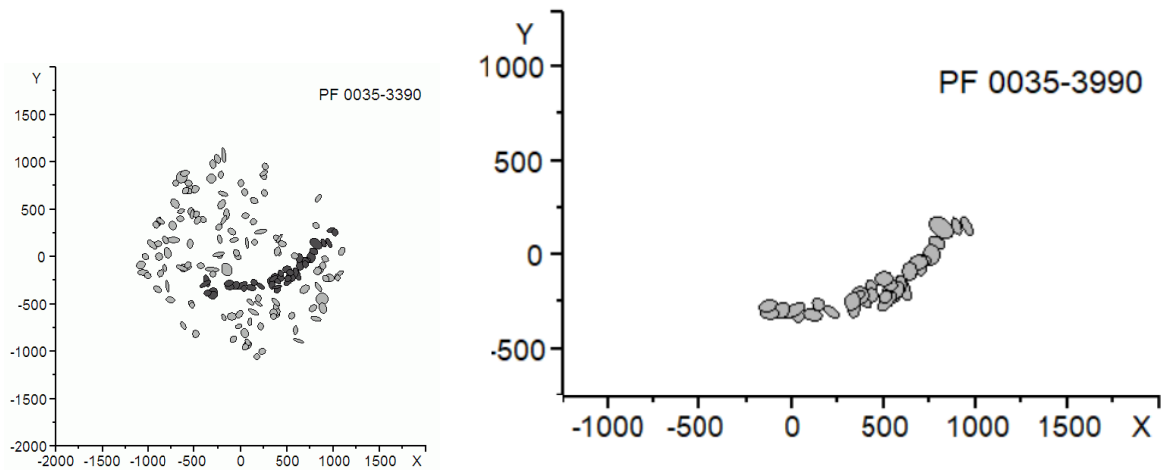


Рис. 4.5. Викривлений щільний ланцюжок з двома типами вирівнювання галактик

Аналогічні ланцюжки знайдено більш, ніж у 10 випадках. Два таких, ще було знайдено в ізолюваних скупченнях, показано на [рис. 4.6](#), де бачимо на гістограмі для кута  $\theta$  для першого скупчення вирівнювання вздовж ланцюжка, у другому – два типи вирівнювання.

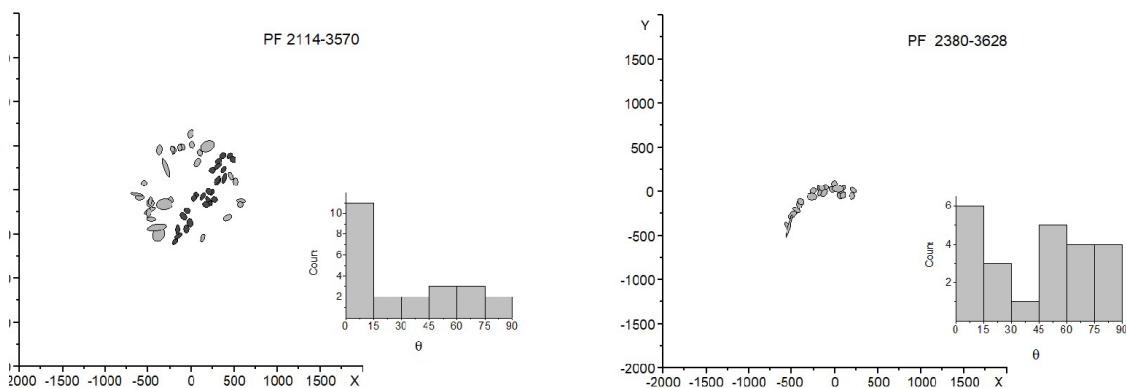


Рис. 4.6. Вирівнювання галактик у ланцюжках, на гістограмах показано розподіл гострого кута  $\theta$  між середньою лінією ланцюжка та напрямом великої осі галактики

Найперспективніший приклад ланцюжка щодо вивчення вирівнювання галактик було знайдено у скупченні PF 0380-4550 ([рис. 4.7](#)). Скупчення типу

IL7 має яскраву галактику у центрі, велика вісь якої чітко орієнтована вздовж ущільненої смуги (червона пряма на рисунку). Ланцюжок, що, можливо, не пов'язаний зі скупченням, також виділено темним. Поруч його показано зі збільшенням.

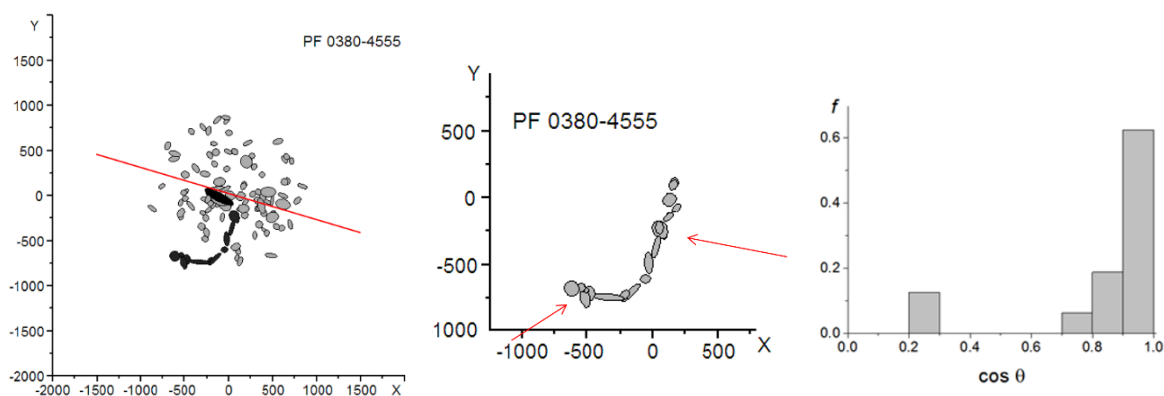


Рис. 4.7. Ланцюжок галактик у скупченні PF 0380-4550 та розподіл гострого кута  $\theta$  між напрямом на сусіда та напрямом великої осі галактики у ланцюжку

Саме це скупчення було першим, де у межах дисертаційного дослідження досліджувалися вирівнювання галактик. Воно дало поштовх до пошуку подібних структур в інших скупченнях. Для ланцюжка розподіл косинусу гострого кута  $\theta$  між напрямом на найближчого сусіда та великою віссю зображення галактики є дуже виразним: 16 галактик демонструють вирівнювання вздовж ланцюжка, більша частка з них має значення косинусу кута  $\theta$  від 0.9 до 1.0. У той же час тільки 2 галактики з 18 орієнтовано інакше, хоча, можливо, вони вирівнюються до напрямку на найближчу галактику у тривимірному просторі. Їх на [рис. 4.7](#) показано стрілками.

За значеннями еліптичностей галактик ланцюжка можна дійти до висновку, що у ланцюжку аномально велика частка дискових галактик. Тому порівнювати цей ланцюжок з відомим Ланцюжком Маркаряна [75] не зовсім коректно. Ланцюжок Маркаряна містить 7 галактик у скупченні Діва,

причому 4 з них еліптичні галактики та 3 – дискові (2 лінзоподібні та 1 спіральна). Чіткого вирівнювання до напрямку на сусіда вони не показують.

Ще незвичний один приклад щільного ланцюжка було виявлено у розсіяному скупченні PF 0407-6535, до якого віднесено 214 галактик. Розподіл галактик у полі скупчення показано на [рис. 4.8](#), ланцюжок обведено лінією. Окремо галактики ланцюжка показано праворуч.

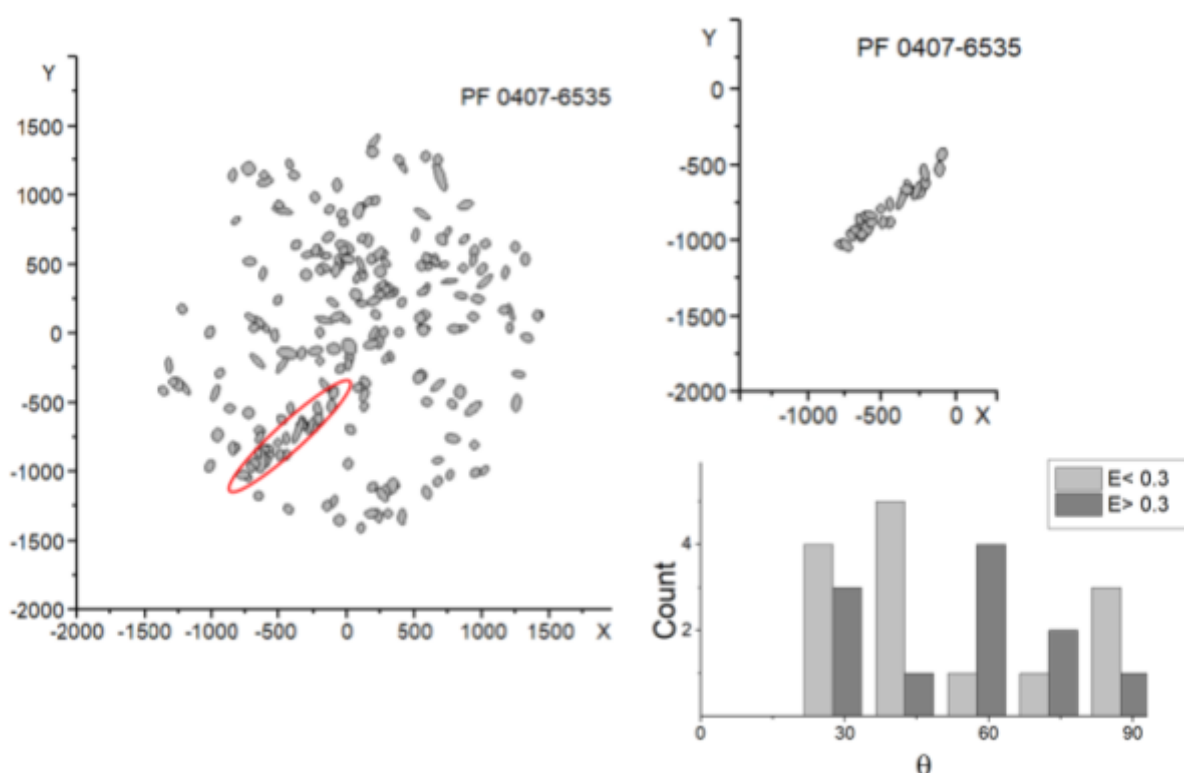


Рис. 4.8. Скупчення PF 0407-6535, надщільний ланцюжок та розподіл орієнтацій галактик у ньому

Щільність галактик у ланцюжку, істотно перевищує середню по скупченню. Попри те що довжина ланцюжка становить 0.5 діаметру скупчення, на гістограмі нормованих щільностей він дає значущий пік: 0.35 для ширини полоси 1/7 та 0.28 для 1/9. Середня за іншими полосами густина визначається на рівні 0.12. На LightHouse Beam діаграмі пік щільності також

чітко виділяються. Тому вважаємо, що щільний ланцюжок, в якому об'єднано 24 галактики є реальним утворенням.

Можна оцінити кутові розміри ланцюжка:  $1300'' \times 250''$  (при діаметрі скупчення  $2850''$  з [59]).

Найбільш незвичайним у ланцюжку є вирівнювання галактик. Ми проаналізували розподіли гострого кута  $\theta$  між напрямом самого ланцюжка ( $54^\circ \pm 3^\circ$ ) та позиційними кутами галактик. З урахуванням різної точності визначення напрямку великої осі найкращого еліпса для малих та великих еліптичностей, відповідні розподіли для  $E < 0.3$  та  $E > 0.3$  показано на [рис. 4.8](#) різними відтінками. На відміну від інших скупчень, у ланцюжку скупчення PF 0407-6535 немає галактик, які би показували вирівнювання вздовж ланцюжка. Розглядати його, як стіну, що орієнтована точно вздовж променя зору, значущих підстав немає. Скупчення PF 0407-6535 також віднесено до об'єктів каталогу PF, що потребують окремого вивчення.

Невелика кількість щільних ланцюжків з галактик, що було детектовано у скупченнях, на вибірці з понад 500 скупчень вказує що їхнє виникнення та/або збереження протягом довгого часу потребує особливих умов.

### **4.3. Основні результати за розділом IV.**

За допомогою пакету SS було вивчено особливі випадки розподілу галактик у скупченнях та досліджено розподіл орієнтацій галактик в них.

Було підтверджено, що яскраві галактики у центрі концентрованих скупчень орієнтовані згідно до загальної орієнтації скупчення. Було знайдено, що для скупчень проміжної концентрації до центру існує таке ж вирівнювання галактик. Для лінійних та хрестоподібних підструктур яскраві галактики скупчень концентруються до областей найбільшої щільності. Орієнтації яскравих галактик також не є випадковими: вони вирівнюються відповідно до напрямку підструктури, до якої належать.

Особливі та рідкісні щільні викривлені ланцюжки є фізично пов'язаними утвореннями. Їхні розміри трохи менші за розмір батьківського скупчення, товщина набагато менша за довжину, щільність галактик у ланцюжках значно перевищує середню по скупченню, та близька до щільності центральних згущень у концентрованих скупченнях. Щільні ланцюжки, як й особливості орієнтацій галактик в них потребують подальшого вивчення.

Створена під час виконання дисертаційного дослідження програма СС дозволяє відшукувати незвичайні особливості, що можуть бути підставою для удосконалення теоретичних розробок та перевірки комп'ютерних симуляцій.

Всі задачі Розділу IV виконано у повному обсязі. Результати, що подано у Розділі III, опубліковано у статтях [A1](#), [A2](#), [A3](#), а також додаткових публікаціях [A18](#), [A19](#), [A20](#). Також результати опубліковано у тезах конференцій [A7 – A14](#), [A16](#) та обговорювалося на 7-х міжнародних наукових конференціях.

## ВИСНОВКИ

Створення та використання пакету Cluster Cartography дозволило швидко вивчити особливості внутрішньої будови понад 500 скупчень галактик каталогу PF та дійти до наступних висновків:

1. Розподіл скупчень за ступенем концентрації до центру залежить від загальної щільності галактик в околицях скупчення. Якщо розглядати набір з 460 скупчень з кількістю галактик  $N \geq 100$  як базовий, то в областях екстремальної щільності частка скупчень проміжної концентрації істотно вища за типову. Для областей підвищеної щільності це можна пояснити впливом близько розташованих великих мас. Серед ізольованих скупчень більшість є розсіяними, що пояснюється загальною невеликою густиною та малим контрастом густини  $DM$ , що дає повільне стискання.

2. Еволюція скупчень галактик у надскупченнях йде під значущим впливом інших членів надскупчення.

3. Виникнення лінійних підструктур є типовим явищем, його потрібно враховувати при вивченні складних еволюційних сценаріїв для скупчень галактик.

4. Більш складні внутрішні особливості, а саме хрести та пів-хрести, у скупченнях галактик також є регулярними підструктурами. Вони відображають формування скупчень на перетинах філаментів.

5. Розподіл та вирівнювання яскравих галактик у підструктурах відображає розподіл ущільнень підстилаючої сітки темної матерії.

6. За вирівнюванням яскравих галактик у підструктурі можна розділити філаменти та стіни.

7. Рідкісні щільні викривлені ланцюжки, які було знайдено та проаналізовано вперше, показують дуже сильне вирівнювання галактик 2-х типів: вздовж ланцюжка (вирівнювання як у філаментах) або вздовж та



поперек ланцюжка (вирівнювання як у стінах). Це потребує подальшого детального вивчення.

Автор вважає за потрібне виказати подяку сервісам The SAO/NASA Astrophysics Data System Abstract Service за вільний доступ до провідних публікацій за темою дослідження та NASA/IPAC Extragalactic Database за інформацію про галактики та їхні скупчення.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Jõeveer, M., & Einasto, J. "Has the Universe the Cell Structure?" // In: "The Large Scale Structure of the Universe," Proceedings of Symposium No 79, Tallin, Estonian SSR, September 12–16, 1977, edited by M. S. Longair & J. Einasto, Dordrecht, D. Reidel Publishing Co. — 1978 — P. 241-250.
2. Einasto J E. "The Structure of Galactic Systems" / J E. Einasto // Soviet Physics Uspekhi. — 1976. — Vol. 19, P. 955–956. DOI: 10.1070/PU1976v019n11ABEH005358.
3. Planck Collaboration. "Planck 2015 results XIII. Cosmological parameters" // Astronomy & Astrophysics — 2016 — DOI: 10.1051/0004-6361/201525830.
4. Panko E. "Galaxy Clusters, Their Components, and Evolution" / E. Panko // PTA Proceedings. — 2019. — Vol. 9, p. 178. DOI: pta.edu.pl/proc/v9p178.
5. B. Jain, U. "Ray-tracing simulations of weak lensing by large-scale structure" / B. Jain, U. Seljak, S. White // The Astronomical Journal. — 2000. — Vol. 530, p. 547.
6. Zeldovich, Y. B. "Gravitational instability: An approximate theory for large density perturbations" / Y. B. Zeldovich // Astron. Astrophys. — 1970. — V. 5, P. 84-89.
7. Peebles, P.J.E., "Origin of the Angular Momentum of Galaxies" / P.J.E. Peebles // The Astronomical Journal. — 1969. — V. 155, P. 393.
8. Springel et al. (2005), Springel V., White S. D., Jenkins A., et al. 2005, Nature. , 435, 629
9. 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. — V. 444, I. 2, P. 1518–1547, <https://doi.org/10.1093/mnras/stu1536>.

10. Artale M. C. "Small-scale galaxy clustering in the EAGLE simulation" / M. C. Artale, S. E. Pedrosa, J. Trayford, et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — V. 470, P. 1771-1787.

11. Cui W. "The large-scale environment from cosmological simulations – I. The baryonic cosmic web" / W. Cui, A. Knebe, G. Yepes, et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2018. — V. 473, I. 1, P. 68–79, <https://doi.org/10.1093/mnras/stx2323>.

12. Ishiyama, T. "The Uchuu simulations: Data Release 1 and dark matter halo concentrations" / T. Ishiyama, F. Prada, A. A. Klypin, et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2021. — V. 506, I. 3, P. 4210–4231, <https://doi.org/10.1093/mnras/stab1755>.

13. Wen Z. L. "Galaxy Clusters Identified from the SDSS DR6 and Their Properties" / Z. L. Wen, J. L. Han, F. S. Liu // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 2009. — V. 183, Number 2, P. 197. DOI: 10.1088/0067-0049/183/2/197.

14. Dietrich J. P. "A filament of dark matter between two clusters of galaxies" / J. P. Dietrich, N. Werner, D. Clowe, et al. // *Nature*. — 2012. — V. 487, P. 202–204.

15. Parekh V. "A rare case of FR I interaction with a hot X-ray bridge in the A2384 galaxy cluster" / V. Parekh, T. F. Laganá, K. Thorat, et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2020. — V. 491, I. 2, P. 2605–2616, <https://doi.org/10.1093/mnras/stz3067>.

16. Markevitch M. "Direct Constraints on the Dark Matter Self-Interaction Cross Section from the Merging Galaxy Cluster 1E 0657-56" / M. Markevitch, A. H. Gonzalez, D. Clowe, et al. // *The Astrophysical Journal*. — 2004. — V. 606, P. 819–824.

17. Abell G. O. "The Distribution of Rich Clusters of Galaxies" / G. O. Abell // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 1958. — V. 3, P. 211–288.

18. Zwicky F. "Catalogue of Galaxies and of Clusters of Galaxies" / F. Zwicky, E. Herzog, P. Wild, et al. // Pasadena, California Institute of Technology.

— 1961 — 1968. — P. 1–43. Online Data:  
<http://vizier.cfa.harvard.edu/viz-bin/VizieR?-source=VII/190>.

19. 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. — V. 70, P. 1–138.

20. Bautz L. P. "On the Classification of the Forms of Clusters of Galaxies" / L. P. Bautz, W. W. Morgan // *The Astrophysical Journal*. — 1970. — V. 162, P. L149–L153.

21. 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. — V. 83, P. 313–319.

22. López-Cruz, O. 2004, "The Classification of Clusters of Galaxies: Comments on the Proposal of a New Subclass" // In: "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, P. 109–122.

23. Oemler, A. Jr. "The Systematic Properties of Clusters of Galaxies. Photometry of 15 Clusters" / A. Oemler Jr. // *The Astrophysical Journal*. — 1974. — V. 194, P. 1–20.

24. Panko, E. A. "The Criteria for Morphological Classification of PF Galaxy Clusters" / E. A. Panko // *Odessa Astronomical Publications*. —2013— V. 26, P. 90-93.

25. Bahcall, N. A., "Clusters and Superclusters of Galaxies," In: *Formation of Structure in the Universe*. Cambridge University Press — 1999 — P. 135.

26. Panko, E. "The Ellipticities of Galaxies in Galaxy Clusters of Different Morphological Types" / E. Panko, P. Flin // *Odessa Astronomical Publications*. — 2014. — V. 27, P. 32-33.

27. Jones, C., & Forman, W. 1992, "Imaging the Hot Intracluster Medium" in *Clusters and Superclusters of Galaxies*, Proceedings of NATO Advanced Study Institute, held at the Institute of Astronomy, July 1-10, 1991, Dordrecht: Kluwer,

edited by A. C. Fabian, NATO Advanced Study Institute (ASI) Series C, V. 366, P. 49–70. DOI: 10.1007/978-94-011-2482-9\_4.

28. Jones, C. "Einstein Observatory Images of Clusters of Galaxies" / C. Jones, W. Forman // *The Astrophysical Journal*. — 1999. — V. 511, Number 1, P. 65. DOI: 10.1086/306646.

29. White, S. D. M. "The Dynamics of Rich Clusters of Galaxies" / S. D. M. White // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1976. — V. 177, I. 3, P. 717–733. DOI: 10.1093/mnras/177.3.717.

30. Carnevali, P. "Merging Instability in Groups of Galaxies" / P. Carnevali, A. Cavaliere, P. Santangelo // *The Astrophysical Journal*. — 1981. — V. 249, P. 449–461. DOI: 10.1086/159305.

31. Farouki, R. T. "The Collapse and Violent Relaxation of N-body Systems - Mass Segregation and the Secondary Maximum" / R. T. Farouki, G. L. Hoffman, E. E. Salpeter // *The Astrophysical Journal*. — 1983. — V. 271, P. 11–21. DOI: 10.1086/161171.

32. Struble, M. F. "Morphological Classification (Revised RS) of Abell Clusters in  $D = 5$  and an Analysis of Observed Correlations" / M. F. Struble, H. J. Rood // *The Astronomical Journal*. — 1984. — V. 89, P. 1487–1513. DOI: 10.1086/113650.

33. Bardeen, M. "Spontaneous Creation of Almost Scale-Free Density Perturbations in an Inflationary Universe" / M. Bardeen, P. J. Steinhardt, M. S. Turner // *Physical Review D*. — 1983. — V. 28, P. 679–693. DOI: 10.1103/PhysRevD.28.679.

34. Guth, A. H. "Fluctuations in the New Inflationary Universe" / A. H. Guth, S.-Y. Pi // *Physical Review Letters*. — 1982. — V. 49, P. 1110–1113. DOI: 10.1103/PhysRevLett.49.1110.

35. Starobinsky, A. A. "Dynamics of Phase Transition in the New Inflationary Universe Scenario and Generation of Perturbations" / A. A. Starobinsky // *Physics Letters B*. — 1982. — V. 117, I. 3, P. 175–178. ISSN: 0370-2693. DOI: [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(82\)90541-X](https://doi.org/10.1016/0370-2693(82)90541-X).

36. Bardeen, J. M. "The Statistics of Peaks of Gaussian Random Fields" / J. M. Bardeen, J. R. Bond, N. Kaiser, A. S. Szalay // *The Astrophysical Journal*. — 1986. — V. 304, P. 15–61. DOI: 10.1086/164143.

37. Bond, J. R. "Cosmic Background Radiation Anisotropies in Universes Dominated by Nonbaryonic Dark Matter" / J. R. Bond, G. Efstathiou // *The Astrophysical Journal*. — 1984. — V. 285, P. L45–L48. DOI: 10.1086/184362.

38. Eisenstein, D. J. "Power Spectra for Cold Dark Matter and Its Variants" / D. J. Eisenstein, W. Hu // *The Astrophysical Journal*. — 1999. — V. 511, P. 5–15. DOI: 10.1086/306640.

39. Peebles, P. J. E. "Large-scale Background Temperature and Mass Fluctuations due to Scale-Invariant Primeval Perturbations" / P. J. E. Peebles // *The Astrophysical Journal*. — 1982. — V. 263, P. L1–L5. DOI: 10.1086/183911.

40. Evrard, A. E. "Beyond N-body - 3D Cosmological Gas Dynamics" / A. E. Evrard // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1988. — V. 235, P. 911–934. DOI: 10.1093/mnras/235.3.911.

41. Springel, V. "Simulations of the Formation, Evolution and Clustering of Galaxies and Quasars" / V. Springel, S. D. M. White, A. Jenkins, C. S. Frenk, et al. // *Nature*. — 2005. — V. 435, P. 629–636. DOI: 10.1038/nature03597. arXiv: astro-ph/0504097.

42. Vogelsberger, M. "Introducing the Illustris Project: Simulating the Coevolution of Dark and Visible Matter in the Universe" / M. Vogelsberger, S. Genel, V. Springel, P. Torrey, et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2014. — V. 444, P. 1518–1547. DOI: 10.1093/mnras/stu1536.

43. Artale, M. C. "Small-scale Galaxy Clustering in the EAGLE Simulation" / M. C. Artale, S. E. Pedrosa, J. W. Trayford, T. Theuns, et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — V. 470, Page 1771. DOI: 10.1093/mnras/stx1263.

44. Kaviraj, S. "The Horizon-AGN Simulation: Evolution of Galaxy Properties over Cosmic Time" / S. Kaviraj, C. Laigle, T. Kimm, J. E. G. Devriendt,

et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2017. — V. 467, I. 4, P. 4739–4752. DOI: 10.1093/mnras/stx126.

45. Cui, W. "The Large-Scale Environment from Cosmological Simulations – I. The Baryonic Cosmic Web" / W. Cui, A. Knebe, G. Yepes, X. Yang, et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2018. — V. 473, P. 68–79. DOI: 10.1093/mnras/stx2323.

46. Codis, S. "Intrinsic Alignment of Simulated Galaxies in the Cosmic Web" / S. Codis, R. Gavazzi, Y. Dubois, et al. // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2015. — V. 448, P. 3391–3404. DOI: 10.1093/mnras/stv231.

47. Wang, J. "Universal Structure of Dark Matter Haloes over a Mass Range of 20 Orders of Magnitude" / J. Wang, S. Bose, C. S. Frenk, L. Gao, et al. // *Nature*. — 2020. — V. 585, P. 39–42. arXiv: 1911.09720.

48. Diemand, J. "Formation and Evolution of Galaxy Dark Matter Halos and Their Substructure" / J. Diemand, M. Kuhlen, P. Madau // *The Astrophysical Journal*. — 2007. — V. 667, P. 859–877. DOI: 10.1086/520573.

49. Bond, J. R. "How Filaments of Galaxies are Woven into the Cosmic Web" / J. R. Bond, L. Kofman, D. Pogosyan // *Nature*. — 1996. — V. 380, P. 603–606. DOI: 10.1038/380603a0.

50. Panko, E. "Isolated Clusters of PF Catalogue" / E. Panko, S. Andrievsky // *Odessa Astronomical Publications*. — 2012. — V. 25/2, P. 135–137.

51. Binggeli, B. "The Shape and Orientation of Clusters of Galaxies" / B. Binggeli // *Astronomy and Astrophysics*. — 1982. — V. 107, P. 338–349.

52. Rhee, G. F. R. N. "A Study of the Elongation of Abell Clusters. I – A Sample of 37 Clusters Studied Earlier by Binggeli and Struble and Peebles" / G. F. R. N. Rhee, P. Katgert // *Astronomy and Astrophysics*. — 1987. — V. 183, I. 2, P. 217–227.

53. Plionis, M. "Position Angles and Alignments of Clusters of Galaxies" / M. Plionis // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. — 1994. — V. 95, P. 401–412.

54. Onuora, L. I. "The Alignment of Clusters Using Large-Scale Simulation" / L. I. Onuora, P. A. Thomas // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2000. — V. 319, P. 614–618.

55. van Kampen, E. "Alignment of cD-Galaxies with Their Surroundings" / E. van Kampen, G. Rhee // *Proceedings of International Astronomical Union Colloquium*. — 1990. — No. 124, P. 255–260.

56. Godłowski, W., Baier, F. W., MacGillivray, H. T. "Substructures and Galaxy Orientations in Clusters. I. The Cluster Abell 754" / W. Godłowski, F. W. Baier, H. T. MacGillivray // *Astronomy and Astrophysics* — 1998 — V. 339, P. 709–718.

57. Baier, F. W. "Substructures and Galaxy Orientations in Clusters II. Cluster Abell 14" / F. W. Baier, W. Godłowski, H. T. MacGillivray // *Astronomy and Astrophysics*. — 2003. — V. 403, P. 847–856.

58. Panko, E. "Orientation of Brighter Galaxies in Nearby Galaxy Clusters" / E. Panko, T. Juszcyk, P. Flin // *The Astronomical Journal*. — 2009. — V. 138, P. 1709–1713. DOI: 10.1088/0004-6256/138/6/1709.

59. Panko, E. "A Catalogue of Galaxy Clusters and Groups Based on the Muenster Red Sky Survey" / E. Panko, P. Flin // *The Journal of Astronomical Data*. — 2006. — V. 12, I. 1, P. 1-9.

60. 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. — V. 9, P. 1–12.

61. Biernacka, M. "On the Evolution of Low-Redshift Galaxy Structures" / M. Biernacka, P. Flin, E. Panko // *The Astrophysical Journal*. — 2009. — V. 696, P. 1689–1692.

62. Panko, E. "The Shape of Galaxy Structures" / E. Panko, T. Juszcyk, M. Biernacka, P. Flin // *The Astrophysical Journal*. — 2009. — V. 700, P. 1686–1689.

63. Godłowski, W. "The Orientation of Galaxies in Galaxy Clusters" / W. Godłowski, P. Piwowarska, E. Panko, P. Flin // *The Astrophysical Journal*. — 2010. — V. 723, P. 985–992.



64. Godlowski, W. "The Environmental Effects in the Origin of Angular Momenta of Galaxies" / W. Godlowski, P. Piwowarska, E. Panko, P. Flin // *Acta Physica Polonica B*. — 2011. — V. 42, P. 2313-2322.

65. Ramella, M., Nonino, M., Boschin, W., Fadda, D. "Cluster Identification via Voronoi Tessellation" // In: "Observational Cosmology: The Development of Galaxy Systems," Proceedings of the International Workshop, eds. G. Giuricin, M. Mezzetti, and P. Salucci. Astronomical Society of the Pacific — 1999— V. 176, P. 108–112.

66. Ramella, M. "Spectroscopic Confirmation of Clusters from the ESO Imaging Survey" / M. Ramella, W. Boschin, S. Bardelli та ін. // *Astronomy and Astrophysics*. — 2000. — V. 360, P. 861–870.

67. Ramella, M. "Finding Galaxy Clusters Using Voronoi Tessellations" / M. Ramella, W. Boschin, D. Fadda, M. Nonino // *Astronomy and Astrophysics*. — 2001. — V. 368, P. 776–786.

68. Biernacka, M. "On the Determination of Galaxy Structure" / M. Biernacka, P. Flin, E. Panko, T. Juszczyk // *Odessa Astronomical Publications*. — 2007. — V. 20, P. 26–29.

69. Maddox, S. J. "The APM Galaxy Survey. I – APM Measurements and Star–Galaxy Separation" / S. J. Maddox, G. Efstathiou, W. J. Sutherland, J. Loveday // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 1990. — V. 243, P. 692–712.

70. Panko, E. A. "The Shapes of the Three-Component Superclusters" / E. A. Panko // *Odessa Astronomical Publications*. — 2011 — V. 24, P. 68-71 (2011).

71. Panko, E. A. "Galaxy Superclusters Detected in the Modified PF-Catalog Using the FoF Method" / E. A. Panko // *Baltic Astronomy*. — 2011 — V. 20, P. 313-316. DOI: 10.1515/astro-2017-0299.

72. Панько, О. О. "Властивості великомасштабних структур південного неба на червоних зміщеннях до 0.2" / О. О. Панько // Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук. — Одеса, 2015. — С. 1-35.

73. Schneider, M. D. "The shapes and alignments of dark matter halos" / M. D. Schneider, C. S. Frenk, S. Cole // *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, — 2012 — V. 2012, DOI: 10.1088/1475-7516/2012/05/030.

74. Joachimi, B. "Galaxy Alignments: An Overview" / B. Joachimi, M. , Cacciato, M., Kitching, T. D., Leonard, A., Mandelbaum, R., Schäfer, B. M., Sifón, C., Hoekstra, H., Kiessling, A., Kirk, D., Rassat, A. // *Space Science Reviews*. — 2015 — V. 193, P. 1–65.

75. Dávila-Kurbán, F. "Spin alignment around TNG300-1 voids" / F. Dávila-Kurbán, M. Lares, D. Garcia Lambas // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. — 2023 — V. 518, I. 2, P. 3095–3105. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac3311>.

76. Markarian, B. E. "Physical chain of galaxies in the Virgo cluster and its dynamic instability" / B. E. Markarian // *Astronomical Journal*. — 1961. — Vol. 66. — P. 555—557.