

ОГЛЯД РОБІТ, ЯКІ МІСТЯТЬ СТАТИСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗОРЯНИХ СКУПЧЕНЬ У БЛИЗЬКИХ ГАЛАКТИКАХ

О. М. Ейгенсон

*Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка
вул. Кирила і Мефодія, 8, Львів, 79005*

(Отримано 4 квітня 2008 р.; в остаточному вигляді — 1 липня 2009 р.)

Зроблено огляд праць, які містять статистичні характеристики зоряних скупчень, в основному кулястих, у близьких галактиках. Відібрано роботи, у яких наведені параметри можна використати для подальшого статистичного аналізу.

Ключові слова: зоряні скупчення, кулясті скупчення, галактики.

PACS number(s): 98.20.Gm

Кулясті скупчення наявні в усіх видах галактик — від карликових до гігантських і від ранніх до пізніх типів. Їхні інтегральні властивості надають інформацію про фізичні характеристики материнських галактик і час їх формування. Тому вивчення систем кулястих скупчень важливе для розуміння еволюційної історії баріонної компоненти галактик. Порівняння кулястих скупчень Галактики й інших галактик показують як подібності, так і цікаві відмінності.

За останні роки значно збільшилася кількість досліджень зоряних скупчень, особливо кулястих, у близьких галактиках. Мета цієї роботи — подати огляд публікацій, які містять статистичні характеристики зоряних скупчень. Деякі з них можна використати для подальшого аналізу. Маємо на увазі передусім багатомірний статистичний аналіз, а також можливість обговорити питання про характер еволюції галактик, монотонний чи вибуховий. Саме це й було критерієм відбору статей.

Гарріс *та ін.* [1] дослідили 131 кулясте скупчення у ближній еліптичній галактиці NGC5128 (відстань 4 Мпс). Навели величини й показники кольору, а також оцінки ефективних розмірів й еліптичності. Показали, що розподіл світності такий, як і в інших гігантських еліптичних галактиках, а розміри й еліптичність — як у Галактиці. Повне число кулястих скупчень в NGC5128 $N \approx 1500$.

Представили каталог фотометричних індексів й еліптичностей, який, на думку автора цієї статті, можна використати як для аналізу головних компонентів, так і для класифікації за допомогою кластерного аналізу.

Страдер *та ін.* [2] вивчили кулясті скупчення в еліптичних галактиках. Нові результати: 1) у гігантських еліптичних галактиках M87 і NGC4649 існує кореляція між світністю й кольором для блакитних (бідних на метали) кулястих скупчень: масивніші — червоніше; 2) дисперсія кольору багатих на метали скупчень вдвоє більша, ніж у бідніших на метали; 3) надзвичайно яскраві, середні за кольором скупчення типові для гігантських еліптичних галактик. Підтверджується співвідношення між кольором кулястих скупчень і світністю галактики; 4) наявні великі від-

мінності в питомій частоті кулястих скупчень між карликовими еліптичними галактиками, незалежно від наявності ядра й частини багатих на метали скупчень; 5) пік функції світності кулястих скупчень однаковий для гігантських і карликових еліптичних галактик.

Мескі *та ін.* [3] розглянули характеристики кулястих скупчень у 79 галактиках скупчення Virgo. Знайшли сильну кореляцію між кольором і величиною блакитних кулястих скупчень: яскравіші скупчення червоніше, ніж слабкі. Для червоної субпопуляції такого ефекту немає. Зробили висновок, що самозбагачення й захоплення польових зір або комбінація цих процесів можуть пояснити ці спостереження.

Гілл і Заріцкі [4] проаналізували структурні параметри 204 скупчень у Малій Магеллановій Хмарі (ММХ). Скупчення в ММХ значно еліптичніші, ніж у Галактиці. Проте, з урахуванням середньої вікової різниці та швидкого руйнування цих систем, порівняння ММХ і Галактики не потрібно інтерпретувати як відмінності чи в початкових властивостях скупчень, чи їх наступної еволюції. Еліптичність сильніше корелює з масою, ніж із віком. Знайдені й інші кореляції (центральна поверхнева яскравість — місцева фонові густина, радіус ядра — припливна сила, розмір — відстань), які можна використати для моделей еволюції.

На думку автора, наведені структурні параметри надалі можна використати для багатомірного статистичного аналізу.

Фан *та ін.* [5] подали нові оцінки віку 91 кулясто-го скупчення в M31, які ґрунтуються на покращених фотометричних даних, теоретичних моделях зоряного синтезу і нових методах підгонки. Два піки молодих і середніх за віком скупчень — на 3 і 8 млрд. років. Підтверджується залежність вік — металічність. Вік доходить до 20 млрд. років.

Цей результат викликає серйозні сумніви, оскільки вік Всесвіту тепер вважається близько 14 млрд. років. Можливо, справа в невдалій підгонці. M31 містить 337 підтверджених і 688 кандидатів у кулясті скупчення.

Спітлер *та ін.* [6] провели широкосмугову фото-

метрію кулястих скупчень у галактиці NGC4594. Дослідили 659 кулястих скупчень. Знайшли дві субпопуляції за металічністю. Три нові відкриття: 1) спостерігається тренд колір — величина для слабкометалевих скупчень; 2) багаті на метали скупчення на 17% менші, ніж бідні на метали; 3) для найяскравіших ($M_v < -9.0$) середні розміри зростають зі світністю.

Тут є матеріал для компонентного та кластерного аналізу.

Чандар *та ін.* [7], спираючись на дані, отримані за допомогою телескопа Габбла, показали світності, кольори й розміри кулястих скупчень у 5 галактиках. Вони використані для оцінки питомих частот, для розуміння, чи є розподіл кольору сумісним із наявністю бідних і багатих на метали кулястих скупчень і для порівняння їхніх відносних розмірів між різними галактиками. Для M81 розподіл кольорів подібний до Галактики і M31. Навпаки, для M51 — майже виключно блакитні й бідні на метали скупчення. Відсутність багатих на метали скупчень указує на те, що історія цієї Sbc-галактики значно відрізняється від нашої Галактики. Загальна питома частота у спіралях корелює скоріше з Габблівським типом, ніж зі світністю або масою галактики. Слабкі скупчення в M101 і NGC6946 мають кольори й розміри, подібні до яскравіших скупчень. Висновок: це або дискові скупчення середнього віку ($3 - 9 \cdot 10^9$), або маломасивний кінець початкової популяції.

Наведені дані можна використати для багатомірної статистики — автор.

Перетт *та ін.* [8] спектроскопічно дослідили понад 200 кулястих скупчень M31. Проаналізували просторові, кінематичні і хімічні властивості. Знайдено, що вміст металів бімодальний з піками при $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -1.4$ і ≈ 0.5 . Багаті на метали скупчення показують центрально-концентрований розподіл, а бідні — меншу просторову концентрацію.

Пенг *та ін.* [9] присвятили свою роботу дослідженню віку, металічності, кінематиці й формуванню кулястих скупчень в NGC5128 — ближній гігантській галактиці. Досліджено тренди за віком, металічністю й кінематикою кулястих скупчень. Розподіл металічності бімодальний. Малометалічні — старі, як і у Галактиці, а металічні мають середній вік $\approx 5_{-2}^{+3}$ млрд. років. Основне тіло галактики було сформоване 3–8 млрд. років тому внаслідок злиття двох дискових галактик, супроводжувалося тривалою акрецією багатих і бідних на газ сателітів.

Потрібно підкреслити факт бімодальності функції металічності в цій і попередній статтях — автор.

Страдер *та ін.* [10] вивчали спектри й походження кулястих скупчень у 8 галактиках — від карликових до масивних еліптичних. Вік виводили з порівняння з галактичними. Обидві популяції, бідні й багаті на метали, не молодші від своїх двійників у Галактиці з віком ≥ 10 млрд. років. Запропоновано сценарій утворення кулястих скупчень, який синтезує аспекти акреції й контекст утворення галактик через ієрархічне злиття.

Ларсен *та ін.* [11] провели спектроскопію кулястих скупчень в еліптичній галактиці NGC4365. Попередні дослідження показали, що тут немає бімодальності в розподілах кольорів. Деякі скупчення проміжного віку ($2 - 5 \cdot 10^9$ років багатші на метали ($-0.4 \geq [\text{Fe}/\text{H}] \geq 0$), ніж старі й бідні. Знайдені також бідні на метали старі скупчення, у результаті утворюється широкий розподіл за кольором.

Страдер і Бреді [12] проаналізували головні компоненти Lick-індексів у галактичних кулястих скупченнях. Відзначено, що виявлення бімодальності в розподілі кольорів у яскравих галактиках разом зі свідченням, що протоскупчення утворились в таких подіях, як головні злиття, привело до припущення, що наймасивніші галактики мали щонайменше два епізоди утворення зір. У Галактиці, проте, обидві популяції кулястих скупчень мають надзвичайно подібний вік. Це означає, що бімодальність повністю завдячує відмінності вмісту металів. У багатьох галактиках бімодальність також завдячує металічності, оскільки більшість цих скупчень також старші, хоча наявна невелика їх кількість проміжного віку.

Ці висновки потрібно особливо підкреслити — автор.

Гарріс *та ін.* [13] навели нові виміри 27 кулястих скупчень у гало ближньої еліптичної галактики NGC5128. Для визначення структурних параметрів (радіус ядра й радіус половини світності, центральна конденсація й еліптичність) використали профілі світності. Комбінуючи це з іншими даними бачимо, що на сьогодні є 43 скупчення з вимірними властивостями. Структурні параметри потрапляють у такий самий діапазон, що й у Галактиці і M31. NGC5128 містить більше скупчень з більшою еліптичністю ($\epsilon > 0.2$), ніж Галактика. ϵ — розподіл цих скупчень нагадує розподіл старих скупчень у Великій Магеллановій Хмарі і M31. У багатомірному просторі структурних величин, таких, як центральна конденсація, поверхнева яскравість, дисперсія швидкостей, відношення маса/світність і *т. д.* кулясті скупчення заселяють тільки вузький район, який називається фундаментальною площиною.

Пенг *та ін.* [14] представляють результати фотометричного і спектроскопічного огляду кулястих скупчень в NGC5128. Використано дані і кольору, і розміру. Отримано нові променеві швидкості для 138 кулястих скупчень. Представлений каталог, який включає положення, фотометрію і швидкості. Один із чудових результатів стосовно кулястих скупчень у різних галактиках — частота, з якою розподіл металічності є бімодальним. Для пояснення цього були запропоновані різні сценарії, серед яких злиття спіральних галактик, багаточисельні епохи зореутворення, ієрархічне злиття.

Тут слід відзначити, що бімодальність уже давно була відзначена в роботах Сучкова і Марсакова, присвячених кулястим скупченням нашої Галактики [27]. Автор цієї статті мав дискусію з названими авторами з цього приводу [28]. Правда, там ішлося тільки про нашу Галактику [29].

Коен *та ін.* [15] дослідили вік і хімічний склад 150 кулястих скупчень у Галактиці M87. Визначили індекси, які вимірюють спектральні характеристики. Знайшли широкий діапазон металічностей. Середня металічність вища, ніж у Галактиці. Бімодальний розподіл металічності ймовірніший, ніж одномодальний. Середня металічність кулястих скупчень приблизно в 4 рази менша, ніж для зір гало. Знайдено відносні інтенсивності Na, Mg і Fe. Поведінка цих елементів у багатих і бідних на метали скупченнях подібна до галактичних скупчень. Хімічна еволюція цих систем, мабуть, ідентична. Середній вік скупчень M87 \approx 13 млрд. років, що подібно до Галактики. Зівставлення металічності з віком показує, що металічні скупчення старші від малометалічних. Причина цього незрозуміла.

За допомогою наведених індексів можна провести багатомірний статистичний аналіз.

Прітцл *та ін.* [16] порівняли хімічний склад кулястих скупчень, зір поля й карликових сферичних галактик. Більшість зір кулястих скупчень нагадує зорі поля такої ж металічності, проте відрізняється від карликових галактик. Ані кулясті скупчення, ані зорі гало, ані зорі товстого диска не показують походження в малих ізольованих системах, як у теперішніх карликових супутниках Галактики.

Якщо Галактика сформувалася головню внаслідок тривалого злиття малих карликових систем, як цього вимагають сценарії холодної темної матерії, то ми можемо прослідкувати це через відношення вмісту елементів в зорях. Подібність вмісту елементів вказує на те, що хімічна еволюція Галактики була однаковою.

Коен *та ін.* [17] дослідили вік і хімічний склад кулястих скупчень у галактиці M49 (NGC4472) — найяскравішої галактики у скупченні Virgo. Виміряно 10 лікських індексів для 47 скупчень. Металічності [Fe/H] від -2.0 до $+0.4$. Знайдено, що металічність і вік кулястих скупчень в M49 і M87 ідентичні, вік скупчень M49 не менше 10 млрд. років.

Вимірювані індекси можуть потім підлягати багатомірному статистичному аналізу — автор.

Маккей і Гілмор [18] вивчили профілі поверхневої яскравості та структурні параметри 53 багатих зоряних скупчень у Малій Магеллановій Хмарі. Знайдено, що вік перебуває в діапазоні $10^6 - 10^{10}$ років. Представлені профілі поверхневої яскравості, включаючи радіуси ядра й оцінки світності та маси. Якщо радіус ядра порівнювати з віком, то, хоча молоді скупчення мають компактне ядро, діапазон радіусів ядра збільшується з віком, так що старі скупчення покривають увесь діапазон радіусів ядра.

Тут знову ж таки є матеріал для багатомірного статистичного аналізу.

Печчі *та ін.* [19] дослідили масивні молоді скупчення в диску M31. Вивчили властивості 67 дуже голубих і, ймовірно, молодих скупчень M31, відібраних за кольором $(B - V)_0 < 0.45$. Вони становлять $\leq 15\%$ від усіх кулястих скупчень в M31. Порівняно з іншими, вони слабші й не такі концентровані. Їхній вік менше 2 млрд. років. Вони розподілені на околиці диска

й мають кінематичні властивості компонент тонкого диска, який швидко обертається. Молоді й бідні на метали, вони вказують на недавнє зореутворення в тонкому диску M31.

Ма *та ін.* [20] дослідили розподіл енергії, а також оцінку віку 78 зоряних скупчень M33 — близької спіральної галактики. Представили CCD — спектрофотометрію 78 скупчень. Використали 17 проміжно-смугових фільтрів від 3800 Å до 10000 Å. Порівнянням фотометрії кожного об'єкта з теоретичними моделями для різних значень металічності оцінено вік. Знайдено, що скупчення формувалися в епоху від $\approx 3 \cdot 10^6$ до 10^{10} років. Результати також показують два піки в утворенні скупчень при $\approx 8 \cdot 10^6$ і 10^9 років.

Було б цікаво зробити багатомірний статистичний аналіз наведених даних.

Беслі *та ін.* [21] провели порівняльне дослідження кулястих скупчень Галактики і M31. Порівнювали інтегральні спектральні індекси 30 кулястих скупчень M31, 20 кулястих скупчень Галактики, а також еліптичних галактик у скупченнях. Лікські CN-індекси у скупченнях M31 і Галактиці посилені стосовно до балджу Галактики, M31 й еліптичного сфероїда. Для [Fe/H] > -0.8 немає систематичних розбіжностей в H_δ , H_γ чи H_β -індексах між скупченнями M31 і Галактики.

Потрібно відзначити, що порівняльний аналіз властивостей кулястих скупчень Галактики та системи M31 свого часу провів за допомогою кластерного аналізу автор [31].

Беслі *та ін.* [22] отримали вік і металічність 23 кулястих скупчень в M31 з інтегральних спектрів, використовуючи підгонку до двох різних моделей. Паралельно також проаналізовано 21 галактичне кулясте скупчення. Кулясті скупчення M31 поділяються на 3 групи за віком і металічністю: стара, бідна на метали група (7 скупчень), старі, багаті на метали (10 скупчень) і скупчення проміжного віку (3–6 млрд. років) та проміжної металічності (6 скупчень). Ця проміжна група немає аналогів у Галактиці.

Хоча ці результати становлять певний інтерес, вибірка надто мала для наступних досліджень.

Бермбі *та ін.* [23] проаналізували структурні параметри найбільшого зразка просторово розділених кулястих скупчень в M31. Виміряно еліптичності й позиційні кути; зроблено висновок, що еліптичності викликані обертанням. Розподіл поверхневої яскравості добре показаний за допомогою двомірної моделі Мічі-Кінга. Як і для інших галактик, багаті на метали скупчення трохи менші, аніж бідні на метали. Є сильні кореляції між структурними параметрами, так само, як і в Галактиці.

Можливе таке застосування, що й у попередніх випадках.

Джіванг *та ін.* [24] представляють спектральний розподіл й оцінки віку 172 кулястих скупчень в M31. Використано 13 проміжно-полосних фільтрів від 3800 Å до 10000 Å. Визначено B і V. Порівнянням фотометрії кожного скупчення з теоретичними моделями отримано оцінки віку. Майже в усіх вік понад 10^9

років і в більшості близько 10^{10} років. Гістограма віку майже одновіршинна, з малим провалом по $\log \tau$ між 10 і 10.2. Недостатня вибірка не дає змоги сказати, чи є гістограма одно- чи багатовіршинною.

Маклафлін *та ін.* [25] представляють базу структурних і динамічних властивостей 153 просторово-розділених скупчень у Галактиці, Магелланових Хмарах і Fornax. Визначено такі параметри: центральна поверхнева яскравість і яскравість, яка відповідає половині світності; радіуси ядра й ефективні радіуси; центральні потенціали, параметри концентрації і припливні радіуси; дисперсії центральних швидкостей і швидкості віддалення; повні світності, маси й енергії зв'язку; центральні густоти; час релаксації. Обчислено показники кольору B–V, почервоніння й відношення маса/світність для цих 153 скупчень плюс для 63 кулястих скупчень у Галактиці.

Фактично те ж стосується й інших гістограм, загальних у цьому абзаці.

Песев *та ін.* [26] наводять нові дані інтегральних біля — інфрачервоних величин для 75 скупчень у Ма-

гелланових Хмарах. Більшість із них скупчень мають надійний вік і металічність на діаграмах колір-величина й охоплюють вік від 10 млн до 15 млрд років і металічність $[Fe/H]$ від -2.17 до $+0.01$.

Ці дані можна використати як для компонентного, так і для кластерного аналізу з метою класифікації скупчень — автор.

Отже, ми бачимо, що деякі наведені дані можна використати для багатомірного статистичного аналізу. Водночас і надалі залишається дискусійним одне з основних питань, яке стосується як утворення сукупності зоряних скупчень, так і еволюції материнських галактик. Це питання про одновіршинність чи багатовіршинність функції металічності і, як наслідок, питання про монотонність чи повторюваність процесу утворення зоряних скупчень. Усе ж таки більшість авторів схиляється до другого варіанта. Можна навести ще ряд аргументів на користь того чи іншого уявлення (докладніше виклад цього питання в докторській дисертації автора [30]).

-
- [1] W. E. Harris, G. L. H. Harris, P. Barmby, D. E. McLaughlin, D. A. Forbes, *Astron. J.* **132**, 2187 (2006).
- [2] J. Strader, J. P. Brodie, L. Spitler, M. A. Beasley, *Astron. J.* **132**, 2333 (2006).
- [3] S. Mieske *et al.*, *Astrophys. J.* **653**, 193 (2006).
- [4] A. Hill, D. Zaritsky, *Astron. J.* **131**, 414 (2006).
- [5] Z. Fan, J. Ma, R. de Grijs, Y. Yang, X. Zhou, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **371**, 1648 (2006).
- [6] L. R. Spitler, S. L. Larsen, J. Strader, J. P. Brodie, D. A. Forbes, M. A. Beasley, *Astron. J.* **132**, 1593 (2006).
- [7] R. Chandar, B. Whitmore, M. G. Lee, *Astrophys. J.* **611**, 220 (2004).
- [8] K. M. Perret *et al.*, *Astron. J.* **123**, 2490 (2002).
- [9] E. W. Peng, H. C. Ford, *Astrophys. J.* **602**, 685 (2004).
- [10] J. Strader, J. P. Brodie, A. J. Cenarro, M. A. Beasley, *Astron. J.* **130**, 1315 (2005).
- [11] S. S. Larsen *et al.*, *Astrophys. J.* **585**, 767 (2003).
- [12] I. Strader, J. P. Brodie, *Astron. J.* **128**, 1671 (2004).
- [13] W. E. Harris, G. L. H. Harris, S. T. Holland, D. E. McLaughlin, *Astron. J.* **124**, 1435 (2002).
- [14] E. W. Peng, Y. C. Ford, K. C. Freeman, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **150**, 367 (2004).
- [15] J. G. Cohen, J. P. Blakeslee, A. Ryzhor, *Astrophys. J.* **496**, 808 (1998).
- [16] B. I. Pritzl, Kim A. Venn, M. Irwin, *Astron. J.* **130**, 2140 (2005).
- [17] J. G. Cohen, J. P. Blakeslee, P. Cote, *Astrophys. J.* **592**, 866 (2003).
- [18] A. D. Mackey, G. F. Gilmore, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **338**, 85 (2003).
- [19] F. Fusi Pecci, M. Bellazzini, A. Buzzoni, E. De Simone, L. Federici, *Astron. J.* **130**, 554, (2005).
- [20] J. Ma, X. Zhou, J. Chen, H. Wu, Z. Jiang, S. Xuc, J. Zhu, *Astron. J.* **123**, 3141 (2002).
- [21] M. A. Beasley, J. P. Brodie, J. Strader, D. A. Forbes, R. N. Proctor, P. Barmby, I. P. Huchra, *Astron. J.* **128**, 1623 (2004).
- [22] M. A. Beasley, J. P. Brodie, J. Strader, D. A. Forbes, R. N. Proctor, P. Barmby, J. P. Huchra, *Astron. J.* **129**, 1412 (2005).
- [23] P. Barmby, S. Holland, J. P. Huchra, *Astron. J.* **123**, 1937 (2002).
- [24] L. Jiong, J. Ma, X. Zhou, J. Chen, H. Wu, Z. Jiang, *Astron. J.* **125**, 727 (2003).
- [25] D. E. McLaughlin, R. P. van der Marel, *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **161**, 304 (2005).
- [26] P. M. Pessev, P. Goudfrooij, T. H. Puzia, R. Chandar, *Astron. J.* **132**, 781 (2006).
- [27] В.А. Марсаков, А. А. Сучков, *Письма Астрон. журн.* **2**, 381 (1976).
- [28] А. М. Эйгенсон, *Астрофизика*, **13**, 545 (1977).
- [29] Л. С. Марочник, А. А. Сучков, *Галактика*, (Наука, Москва, 1984).
- [30] А. М. Эйгенсон, доктор. дисерт. физ.-мат. наук, С.-Петербург (1995).
- [31] А. М. Эйгенсон, О. С. Яцык, *Астроном. циркуляр* **1556** (1993).

**A REVIEW OF WORKS CONTAINING STATISTICAL CHARACTERISTICS
OF STAR CLUSTERS IN NEARBY GALAXIES**

O. M. Ejgenson

*Ivan Franko National University of Lviv, Astronomical Observatory,
8, Kyryla i Mefodija St., Lviv, UA-79005, Ukraine*

A review of papers which contain statistical characteristics of star clusters, predominantly globulars, in nearby galaxies is presented. The selected papers contain data for statistical analysis.