

# У ПОШУКАХ ГАЛАКТИК-АНАЛОГІВ ЧУМАЦЬКОГО ШЛЯХУ



*«То була моя мрія, зняти  
Чумацький Шлях  
над Катеринкою  
(козацький кафедральний собор  
Святої Великомучениці  
Катерини, Чернігів)...  
Однак, ніколи не думав,  
що відсутність світла для цих світ-  
лин стане можливим  
за умов важких обставин  
війни Росії проти України...»  
Автор: Андрій Казун*

**Н**аша Галактика – Чумацький Шлях (ЧШ) – має певні характеристики, що описують її структуру та еволюцію. Морфологічні, фотометричні, кінематичні та хемодинамічні властивості зазвичай враховуються при пошуку аналогів галактик Чумацького Шляху (АЧШ). Виявлення АЧШ-галактик із більшим числом параметрів одночасного відбору та більш суворими обмеженнями на задані параметри дає зразок галактик АЧШ із властивостями, що ближчі до істинних властивостей Чумацького Шляху. Загалом, такі параметри, як морфологічний тип, світність, кольорові індекси, структурні параметри (розмір, балдж, тонкі та товсті диски, внутрішнє кільце, гало), співвідношення балдж–диск, зоряна маса, швидкість зореутворення, металічність і швидкість обертання, використовувалися в різних комбінаціях для відбору галактик. Однак відхилення певних характеристик ЧШ у багатовимірному просторі АЧШ можуть бути суттєвими, тобто ЧШ має деякі індивідуальні особливості.

Такі риси можуть включати зоряну кінематику в певних регіонах, низьку активність ядра і відсутність значного злиття протягом останніх 10 мільярдів років (критерій ізольованості).

Морфологічні, кінематичні та багатохвильові властивості ЧШ, структура спіральних рукавів, хімічна еволюція, низька активність надмасивної чорної діри, космологічне походження та розташування Чумацького Шляху серед сусідніх галактик у космічній павутині є ключовими питаннями сучасної астрофізики.

Чи є Чумацький Шлях типовою гігантською спіральною галактикою? Якщо ні, то чим він відрізняється і скільки галактик-аналогів ЧШ існує? Те, що Чумацький Шлях має загальні співвідношення між різними параметрами, які є характерними для спіральних галактик, свідчить про те, що ЧШ не є чимось незвичайним серед галактик. Таким чином, антропний принцип є, принаймні як перше наближення, виправданим.

Це обґрунтовує відбір АЧШ за будь-якими параметрами ЧШ.

У ранніх роботах для пошуку АЧШ галактик враховували лише морфологічні (спіральна галактика з баром) та фотометричні параметри. Наприклад, у роботі *де Вокулера та Пенса (1973)* ізофотний  $R_{25}=11.5$  кпк і ефективний  $R_{\text{eff}}=5.1$  кпк радіуси визначалися за оптичними даними, як і інші параметри, такі, як діаметр внутрішнього кільця  $D(r)=6$  кпк, світність  $M_{T(B)}=-20.1$ , показник кольору  $B-V=0.53$ , в рамках двокомпонентної моделі структури Чумацького Шляху (сфероїдальної для балджа та експоненціальної для диска). Сучасне уявлення про структурні особливості нашої Галактики подано на рис. 1.

Mutch et al. (2011) створили список АЧШ, використовуючи зоряну масу та структурний параметр (профіль розподілу яскравості) як критерії відбору. Licquia et al. (2015) відібрали АЧШ галактики зі Слоунівського огляду неба, базуючи вибір на їх зоряній масі та темпі зореутворення. Boardman et al. (2020a) представили 62 АЧШ галактики з огляду MaNGA із критеріями відбору за зоряною масою та співвідношенням балдж-диск. Варто зазначити, що вибір АЧШ галактик, використовуючи лише дві характеристики, є типовим підходом і узгоджується з антропним принципом, який стверджує, що Чумацький Шлях не є чимось незвичайним серед інших галактик. Також слід врахувати, що наша Галактика має стабільні періоди обертання: для загальної спіральної структури – 220–360 млн років, для структури балджа – 160–180 млн років і для поточної галактичної позиції Сонця – 212 млн років (рис. 2).

Виявлення аналогів Чумацького Шляху із більшою кількістю параметрів відбору та більш строгими обмеженнями на задані параметри дозволяє отримати вибірку галактик, чії властивості ближчі до справжніх властивостей Чумацького Шляху. Загалом, такі параметри, як морфологічний тип, світність, показники кольору, структурні параметри (розмір, балдж, диск), співвідношення балдж-диск, зоряна маса, темп зореутворення, металічність і швидкість обертання) використовувалися у різних комбінаціях для порівняння з іншими галактиками.

З другого боку, якщо ми використовуємо більше критеріїв відбору, то кількість знайдених АЧШ-галактик значно зменшується або вони зовсім відсутні при пошуку. Так, Fraser-McKelvie et al. (2019) виявили лише 176 АЧШ серед більш ніж мільйона галактик із SDSS DR7, відбираючи їх за трьома параметрами: зоряна

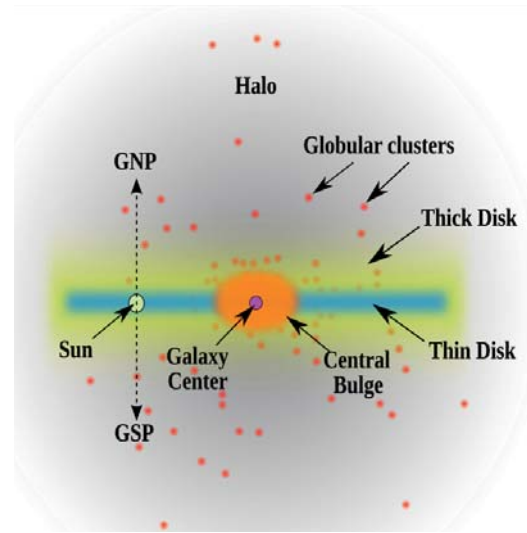


Рис. 1. Структура Чумацького Шляху (Credit: RJHall, at English Wikipedia): центральна частина, балдж, тонкий і товстий диски, кульсті скупчення, гало; вказано положення Сонця та напрямів галактичних північного і південного полюсів

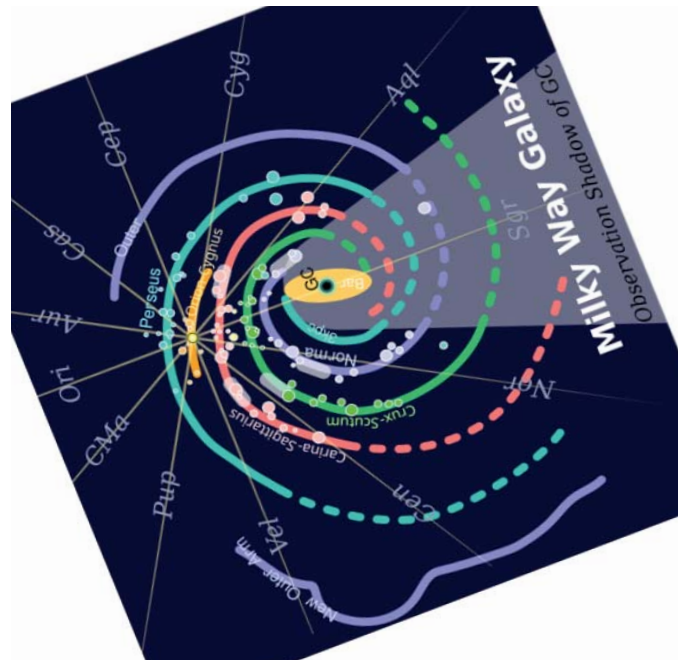


Рис. 1. Структура спіральних рукавів Чумацького Шляху: спостережувані частини рукавів (суцільні лінії) та екстрапольовані (штриховані). Назви рукавів позначені тонкими лініями, положення Сонця (ліворуч) на кінці лінії Оріона. Credit: Stachme, Kevin Krisciunas, Bill Yenne: "The Pictorial Atlas of the Universe", 2007, p. 145

маса, морфологія та співвідношення балдж-диск. Вони дійшли висновку, що наша Галактика має низький темп зореутворення  $\log_{10}(\text{SFR}/M_{\odot}\text{yr}^{-1})=0.22$ , і це не є незвичайним у порівнянні з іншими спіральними галактиками. Boardman et al. (2020a) використали чотири параметри (зоряна маса, темп зореутворення, співвідношення балдж-диск, довжина диска) і не виявили жодного аналога Чумацького Шляху у вибірці MaNGA. Tuntipova et al. (2021) обрали

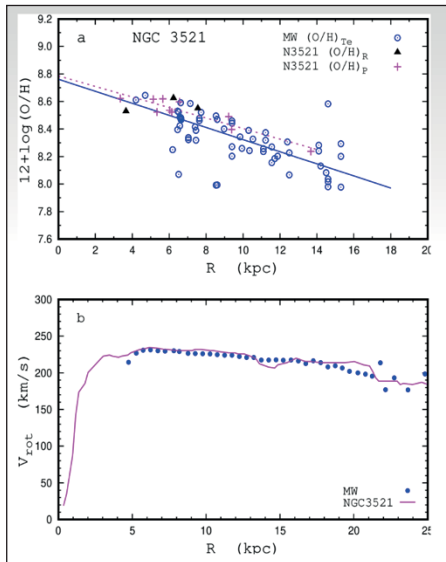


Рис. 3. Порівняння властивостей налактики NGC 3521 ( $\log M_* = 10.70$ ,  $R_{25} = 12.9$  кпк) і Чумацького Шляху ( $\log M_* = 10.71$ ,  $R_{25} = 12.0$  кпк). Зверху: радіальний розподіл вмісту кисню (області III у ЧШ - блакитні кружочки, в NGC3521 - трикутники і знак плюс); знизу: криві обертання (крапки - ЧШ, суцільна лінія - NGC 3521) (Pilyugin et al., 2024)

інші чотири параметри (зоряну масу, темп зореутворення SFR, співвідношення балдж-диск  $B/T$ , та ефективний радіус  $R_{\text{eff}}$ ) для ідентифікації АЧШ-галактик з огляду неба SAMI Galaxy Survey. Поєднання всіх цих параметрів дозволило знайти 10 аналогів Чумацького Шляху у вибірках GAMA та Cluster у рамках SAMI і виявити, що  $B/T$  є найменш важливим серед них.

Pilyugin et al. у серії робіт (2014, 2019, 2023) розглянули нові підходи для пошуку АЧШ-галактик. Вміст кисню характеризує рівень астрації (частку речовини, перетвореної на зорі) і, отже, є показником того, наскільки далеко галактика просунулася у своїй (хімічній) еволюції. Вони розглянули вибірку з близько 500 галактик з огляду MaNGA з критеріями відбору за трьома параметрами (зоряна маса  $M_*$ , оптичний радіус  $R_{25}$ , швидкість обертання  $V_{\text{rot}}$ ) для визначення вмісту кисню в центрі  $(O/H)_0$  і на ізофотному радіусі  $(O/H)_{R_{25}}$ . Вони виявили, що  $(O/H)_{R_{25}}$  у Чумацькому Шляху помітно нижчий, ніж в інших галактиках з подібним значенням у центрі  $(O/H)_0$ . А отже, найбільш помітною особливістю ЧШ є низька металічність на периферії (рис. 3). За цією ознакою було виявлено чотири галактики NGC 3521, NGC 4651, NGC 2903 і MaNGA M-8341-09101, які можна вважати двійниками Чумацького Шляху (Pilyugin et al, 2024).

Такі результати свідчать про те, що деякі параметри ЧШ можуть бути незвичайними або їх поєднання може бути рідкісним. У цьому сенсі ми пропонуємо інший підхід до пошуку ЧШ

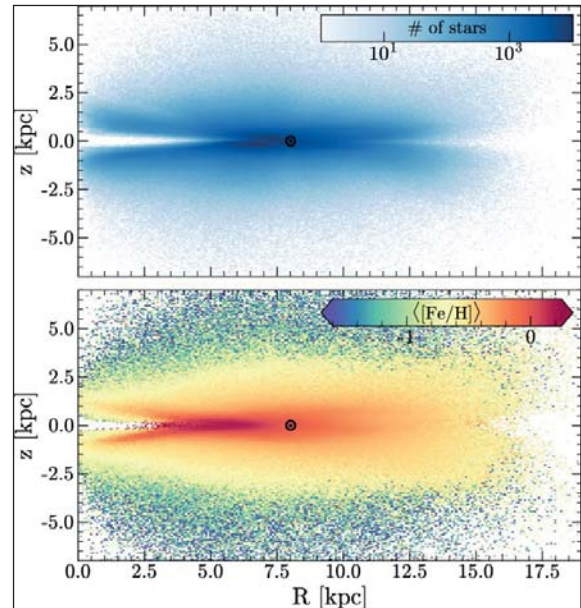


Рис. 4. Розподіл металічності  $[Fe/H]$  в площині  $R-z$  Чумацького Шляху: негативний градієнт зі збільшенням вздовж радіуса і висоти (Rix et al., 2024)

шляхом виділення якомога більшої кількості індикаторів властивостей ЧШ (Vavilova et al., 2024). Це дає змогу розширити критерії відбору для визначення АЧШ, а також ширше розглянути, як властивості ЧШ виглядають для зовнішнього позагалактичного спостерігача.

Будучи типовою спіральною галактикою з баром, Чумацький Шлях має кілька важливих спостережуваних характеристик своєї еволюції. На нашу думку, використання декількох критеріїв відбору для пошуку аналогів Чумацького Шляху є більш ефективним підходом, який розширює загальну картину фізичних властивостей ЧШ та її аналогів, зменшує потенційні упередження в дослідженнях ЧШ та збагачує наші знання для визначення необхідних умов пошуку аналогів Чумацького Шляху.

Отже, зазвичай враховуються такі параметри:

1. Морфологічні та фотометричні параметри, масштабні розміри структур, металічність, зоряна маса, темп зореутворення.

**Морфологічний тип** нашої Галактики визначено як SAB(rs)bc відповідно до де Вокулера і Пенса (1978). Тип SBc (тип T=4) зазвичай використовується для пошуку АЧШ-галактик.

**Основні структурні параметри та металічність.** Чумацький Шлях є гігантською дисковою галактикою, що має чотири (або два?) спіральних рукави із певними кутами закручування (рис. 2), балдж, бар, внутрішнє кільце та гало. Товщина тонкого і товстого дисків зазвичай оці-

нюється в межах 220–450 парсек і 2,6 кілопарсека відповідно.

**Металічність** як ключовий параметр хемодинамічної еволюції розкриває багато факторів, які визначають структурні параметри Чумацького Шляху. При цьому наша Галактика є надзвичайно компактною для своєї швидкості обертання і світності, маючи холодний бар, зоряне населення якого відмінне від населення в балджі.

Хімічні властивості ЧШ є нетиповими в кількох аспектах. З одного боку, ЧШ є однією з найбільш багатих на кисень спіральних галактик у тому сенсі, що металічність у центрі близька до максимально досяжного значення. З іншого боку, вміст кисню вздовж оптичного радіуса помітно нижчий, ніж у галактиках з подібною центральною металічністю. Водночас, ЧШ має дуже крутий градієнт металічності порівняно з більшістю гігантських спіральних галактик, в яких зміна надлишку кисню вздовж оптичного радіуса є досить малою. Іншою особливістю є те, що диск ЧШ сформувався досить рано, протягом перших кількох мільярдів років своєї еволюції. Це узгоджується із загальною популяцією дискових галактик з масою АЧШ. Нагадаємо, що зазвичай вважають, що товщина тонких і товстих дисків становить 220–450 пк і 2.6 кпк відповідно.

Серед інших хемодинамічних особливостей ЧШ, які порівнювали з АЧШ, отриманими в космологічних симуляціях TNG50, відзначимо нещодавнє фундаментальне дослідження Rix et al. (2024). Використовуючи дані Gaia XPSpectra, вони виявили універсальну особливість для ЧШ і АЧШ: їхні надзвичайно багаті на метали гігантські зорі ( $M/H_{\text{HP}} > 0$ ) здебільшого сконцентровані в компактному центральному динамічно гарячому вузлі з  $R < 1.5$  кпк. Беручи до уваги, що зорі ЧШ, бідні на метали, також зосереджені в центральній частині на відстані кількох кілопарсек, майбутні дослідження за допомогою SDSS-V, як пишуть ці автори, дозволять точніше оцінити зоряне населення.

Інший «бік» нашої Галактики, гало 10–80 кпк, досліджували Han et al. (2024) за даними H3 Survey. Вони виявили сильну кінематичну асиметрію розподілу і, як наслідок, холодну та кінематично гарячу фракції зір з дисперсіями радіальних швидкостей 70 км/с та 160 км/с відповідно.

**Внутрішнє кільце.** Щодо особливостей внутрішнього кільця, то Wylie et al. (2022) із вибіркою зірок внутрішньої частини Галактики APO-

GEE DR16 досліджували зовнішню область бару. Вони розглянули орбіти зорь із повільними швидкостями у потенціалі бар–балдж, побудувавши карти їхньої металічності  $[Fe/H]$ , густини та віку. Автори дійшли висновку, що внутрішня кільцеподібна структура ЧШ має середній вік і градієнт збагачення металом вздовж головної осі, яка знаходиться між плоским баром і областю коротації.

**Фотометричні параметри.** Для пошуку АЧШ зазвичай беруть до уваги такі фотометричні параметри: зоряну масу, темп зореутворення; клас світності (II); ізофотний діаметр  $D_{25} = 26.8$  кпк з прийнятою центральною поверхневою яскравістю  $\mu_0 = 22$  B-mag/arcsec<sup>2</sup> і довжини шкали диска  $h = 5$  кпк; ізофотний радіус зазвичай приймають  $R_{25} = 12$  кпк; розмір зоряного диска до 1.35 кпк.

**Маса нашої Галактики** має різні оцінки в залежності від методів та області, в якій проводиться оцінка: від  $8.5 \times 10^{11} M_{\text{Sun}}$  до  $1.4 \times 10^{12} M_{\text{Sun}}$ . Віріальна маса на галактоцентричній відстані менше 21.1 кпк становить  $M_{\text{vir}} = 0.2 \times 10^{11} M_{\text{Sun}}$ ; зоряна маса  $M_* = 5 \times 10^{10} M_{\text{Sun}}$  або  $\log M_* = 10.7$  з лінійною шкалою (B/T,  $R_{\text{eff}}$ ); кількість зір  $N = (1-4) \times 10^{11}$ , але зорі диска Галактики були виявлені за допомогою космічного апарату Gaia навіть за межами 25 кпк від центру ЧШ; густина темної матерії в області положення Сонця MDM =  $0.0088 M_{\text{Sun}} \text{ пк}^{-3}$ , але область темної матерії може простягатися до  $\sim 600$  кпк в гало; темп зореутворення  $\text{SFR} = 1.78 \pm 0.36 M_{\text{Sun}} / \text{рік}$ .

У цьому контексті симуляція Illustris(TNG50), що містить приблизно 100 АЧШ-галактик за масою, може бути використана для визначення їхніх еволюційних треків, щоб з'ясувати, чи існує типовий сценарій еволюції, який призводить до утворення АЧШ-галактик, або оцінити ймовірності різних сценаріїв їхнього утворення.

Ми пропонуємо шукати такий параметр Чумацького Шляху в просторі параметрів, який показує максимальне відхилення від кореляційного співвідношення для АЧШ-галактик. Цей параметр використовується як основний критерій для відбору АЧШ-галактик. Оскільки пошук АЧШ-галактик можливий за будь-якими параметрами ЧШ, ми пропонуємо збільшити їхню кількість як для пошуку АЧШ-галактик, так і для уточнення їхніх властивостей.

У більшості досліджень, як бачимо, галактики-аналоги ЧШ обиралися за двома/трьома параметрами: зоряною масою та деяким додат-

ковим параметром, як правило, відношенням балджа до диска (bulge-to-total), темпу зореутворення. Враховуючи ці параметри, ми пропонуємо вважати першою необхідною умовою пошуку АЧШ-галактик вважати критерій її ізольованості у просторі, а також додати такі властивості ЧШ, як слабку активність ядра і малу масу надмасивної чорної діри (SMBH) та 3D-кінематику для отримання тривимірної кривої обертання і деякі відомі властивості мультахвильового випромінювання ЧШ, пов'язані з її еволюцією.

**3D-кінематика руху зір** може слугувати індикатором для пошуку АЧШ. У серії робіт Fedorov et al. (2021, 2023, 2024) досліджували область Чумацького Шляху за допомогою Gaia EDR3 в діапазонах координат  $120^\circ < \Theta < 240^\circ$ ,  $0 \text{ кпк} < R < 16 \text{ кпк}$ ,  $-1 \text{ кпк} < Z < 1 \text{ кпк}$  на вибірках зір червоних гігантів і субгігантів, центроїди яких лежать у площині ЧШ. Вперше було отримано залежність їхніх кінематичних параметрів від галактоцентричних координат, а також параметри швидкості обертання  $\partial V_R / \partial \Theta$  і  $\partial V_\Theta / \partial \Theta$ .

Наш підхід включає завдання дослідити тривимірну кінематику значної частини ЧШ на основі даних GAIA DR3 в рамках моделі **Огороднікова-Мілна** і використати визначені тензори деформації та швидкості обертання для встановлення спіральної структури ЧШ. Досліджуваний простір зоряних систем обмежений галактоцентричними координатами  $4 \text{ кпк} < R < 14 \text{ кпк}$ ,  $140^\circ < \Theta < 220^\circ$  та  $3 \text{ кпк} < Z < 3 \text{ кпк}$  (рис. 5).

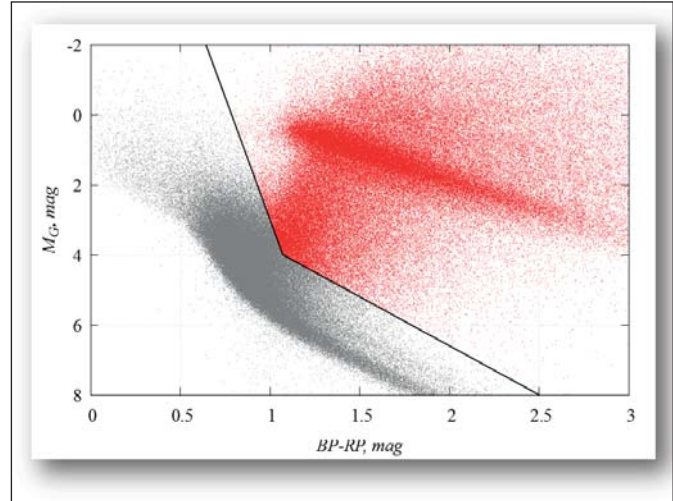


Рис. 5. Розподіл 14.2 млн зорь червоних гігантів і субгігантів (червоний) і зір головної послідовності (чорний) на діаграмі «зоряна величина – різниця показників із кольору у фільтрах  $G_{BP}$  і  $G_{RP}$ » у фотометричній системі даних космічної обсерваторії GAIA (Fedorov et al., 2023)

У цій області переважають старі зорі, які розподілені більш рівномірно, ніж молоді блакитні зорі. Використовуючи отримані компоненти просторових швидкостей центроїдів і кінематичні параметри, ми зможемо побудувати  $V_{rot}(R)$  та їхній нахил у цій області, а також визначити параметри спіральних рукавів, зокрема координати вершин різних зоряних областей. Ці результати можуть слугувати характерними ознаками для застосування машинного навчання в задачах пошуку АЧШ з кінематично холодним диском, що обертається. Переваги 3D кінематики зір показано на рис. 6.



Рис. 6. Ілюстрація переваг використання 3D кінематичних параметрів зір і зоряних систем та революційного збільшення даних про зорі нашої Галактики, які отримані за допомогою космічної обсерваторії GAIA. Як приклад показано збільшення обсягу даних про зорі червоні гіганти і субгіганти

Нагадаємо також, що наша Галактика має як слабку активність ядра, так і малу масу надмасивної чорної діри:  $M_{\text{SMBH}} = 4.61 \times 10^6 M_{\text{Sun}}$ . Центральний об'єкт Sgr A\* зазвичай перебуває у стані спокою, але іноді демонструє швидкі спалахи випромінювання. Це класифікує його як галактичне ядро низької світності, що випромінює на рівні  $10^{-8}$  від границі Еддінгтона. У такому режимі активності ядро ЧШ не має типового газопилового тору, як в багатьох активних ядрах, а має так званий «навколоядерний диск» (CND) у вигляді тороподібного пило-молекулярного газу навколо Sgr A\*, що простягається від  $\sim 1$  пк до 5 пк (рис. 7).

**Критерій ізолюваності.** Чумацький Шлях можна вважати ізолюваною галактикою протягом тривалого часу його еволюції. Умови останнього великого злиття нашої Галактики з об'єктом Gaia-Sausage-Enceladus (GSE), виявлені за розподілом зір гало Чумацького Шляху, вказують, що ця подія відбулася приблизно 8–11 млрд років тому на червоних зміщеннях  $z \sim 2$ . Щонайменше вісім кулястих скупчень від GSE стали членами Чумацького Шляху разом із іншими зорями, газом та темною матерією загальною масою  $50 \times 10^9 M_{\text{Sun}}$ . Зорі, які злилися з Чумацьким Шляхом, мають дуже витягнуті орбіти, а крайні точки їх орбіт знаходяться приблизно в 20 кпк від центру Галактики (рис. 8). Результати чисельного моделювання з високою розрізненістю цього злиття (Naidu et al., 2021) дозволили, зокре-

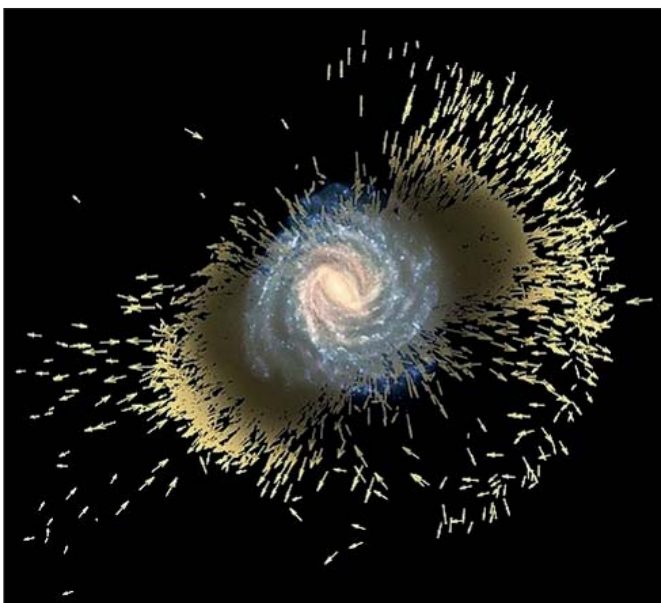


Рис. 8. Ілюстрація спостережуваних зараз наслідків великого останнього злиття нашої Галактики з об'єктом Gaia-Sausage-Enceladus, виявлені за розподілом зір гало. GAIA posters (2021-2023) [https://gruze.org/posters\\_dr3/](https://gruze.org/posters_dr3/)

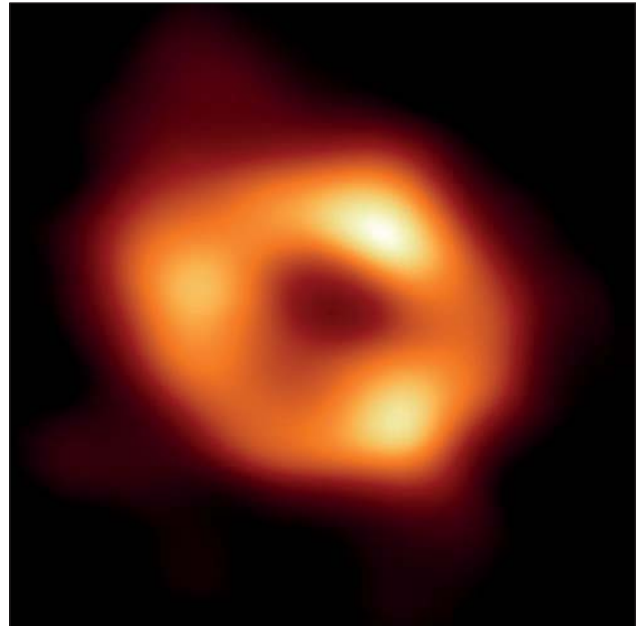


Рис. 7. Перше зображення центрального об'єкта Sgr A\* (Стрілець A\*) у нашій Галактиці, отримане за допомогою Event Horizon Telescope у 2022 р. Sgr A\* випромінює, головним чином, в радіо, ІЧ- та X- діапазонах

ма, визначити як орбітальні параметри злиття з двома розривами профілю розподілу густини маси на  $\sim 15$ -18 кпк і 30 кпк, так і розподіл маси зоряної і темної матерії між GSE і Чумацьким Шляхом. Отже, можна прийняти за робочу гіпотезу, що особливості ЧШ зумовлені його еволюцією без великих злиттів протягом останніх 10 млрд років і необхідною умовою пошуку АЧШ-галактик і критерій їхньої ізолюваності.

Розглянемо критерій ізолюваності галактик АЧШ в масштабах гравітаційного впливу сусідніх галактик, щоб дослідити роль супутників в еволюції галактик АЧШ.

Що таке малі злиття? Як Магелланові Хмари (газові резервуари) впливають на еволюцію ЧШ? Припускається, що Магелланові Хмари можуть бути інтерлоперами з віддаленої частини Місцевої Групи, а не справжніми супутниками Чумацького Шляху, тобто Велика Магелланова Хмара (ВМХ) знаходиться на першому етапі зближення із ЧШ. На цю тему виконано багато робіт, в яких отримано оцінки гравітаційних ефектів від малих галактик-супутників ЧШ і проаналізовано темпи зореутворення в системах галактик, подібних до системи ЧШ, використовуючи прогнозовані відстані між галактиками.

Яким буде майбутнє зіткнення Чумацького Шляху з галактикою Андромеди (M31) приблизно через 5 млрд років? *Sawala* et al. (2024) використали дані спостережень GAIA та Hubble Space Telescope для визначення динамічного

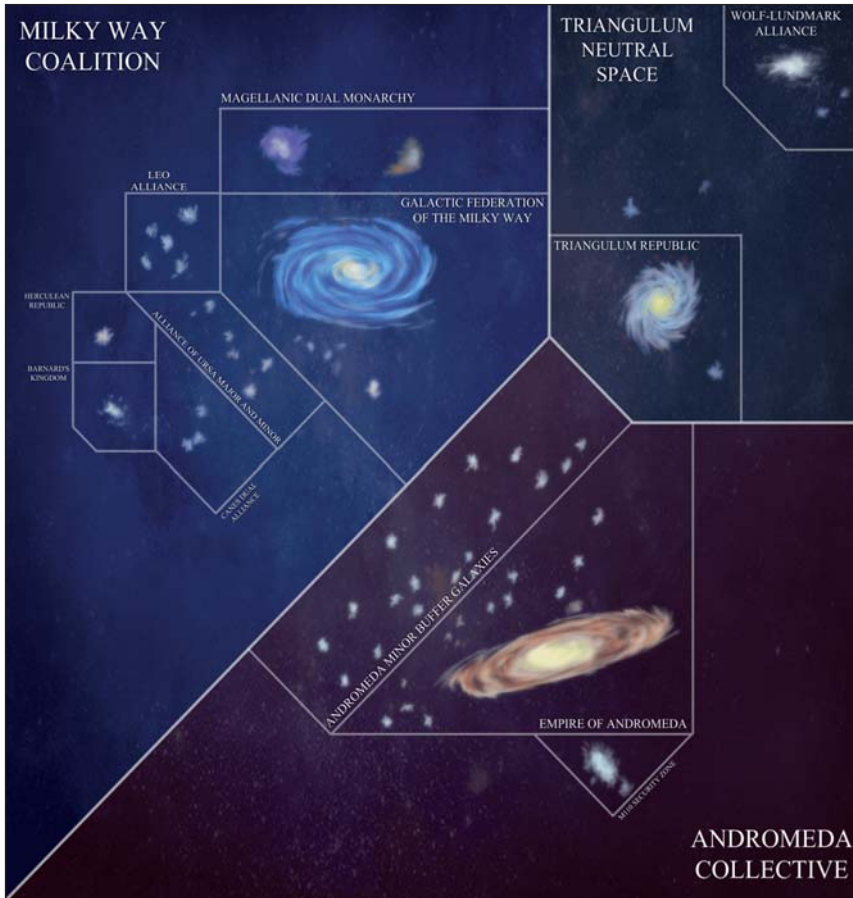


Рис. 9. Ілюстрація «гравітаційної боротьби» упродовж мільярдів років між Чумацьким Шляхом з його супутниками і Туманністю Андромеди (М31) з її супутниками (swedishplayer97)

процесу злиття системи ЧШ-М31. Ці автори передбачили, що М33 і ВМХ, як і інші члени Місцевої групи, можуть зробити це злиття менш імовірним, оскільки орбіта ВМХ проходить перпендикулярно до орбіти системи ЧШ-М31. Більше того, існуючі невизначеності в теперішніх

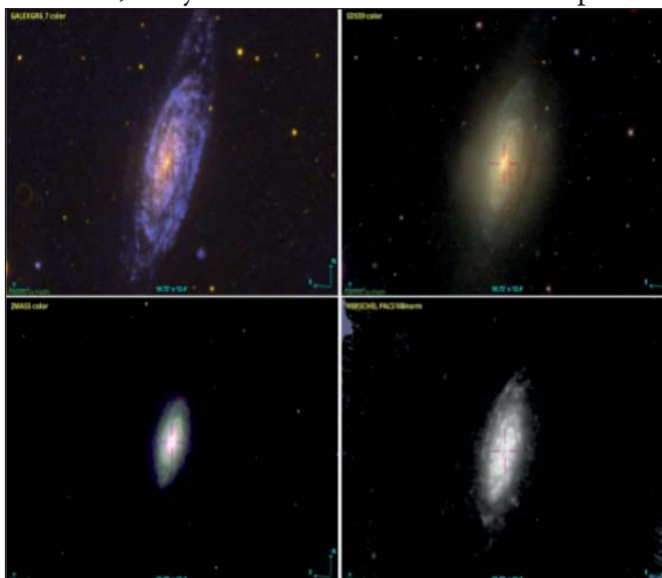
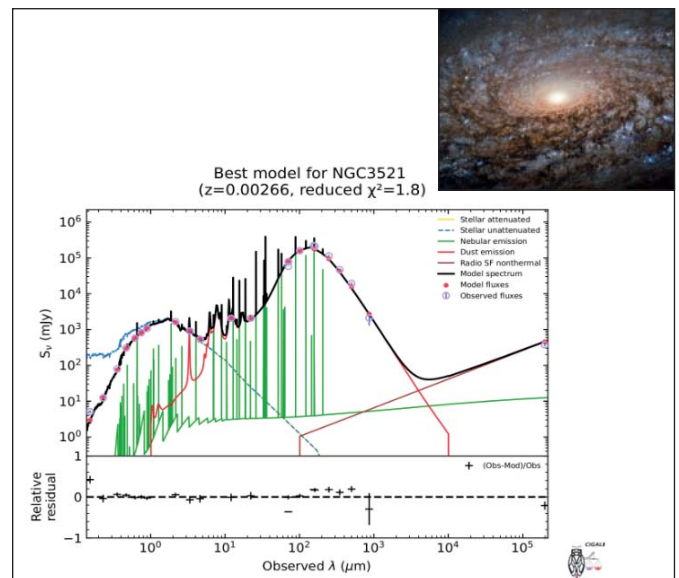
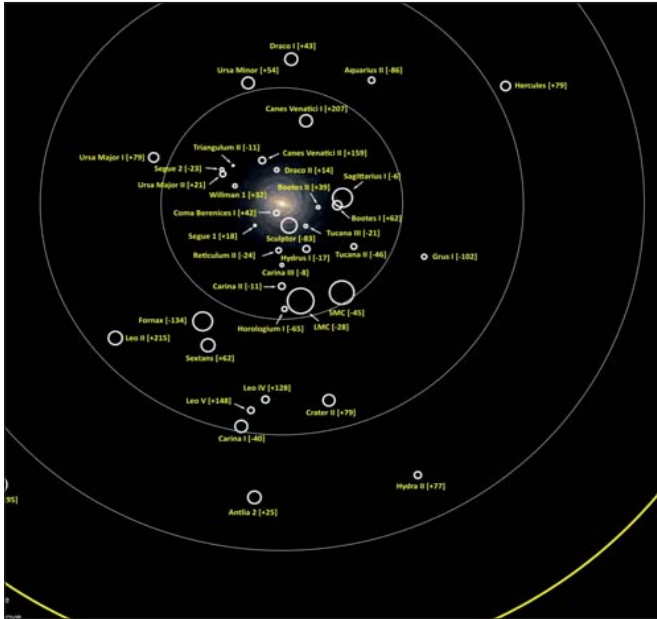


Рис. 10. Ліворуч – мультиспектральні зображення галактики NGC 3521: в УФ-, оптичному та ІЧ- спектральних діапазонах. (зверху праворуч) Оптичне зображення галактики NGC 3521, отримане Hubble Space Telescope (2015 р.). (знизу праворуч) Спектральний енергетичний розподіл NGC 3521, галактики-близнюка Чумацького Шляху, в діапазоні УФ-, оптичний, ІЧ-, радіо (21 см) (Pastoven et al., 2024)

кінематичних і динамічних (маси) даних для галактик Місцевої Групи дають 50 % – 50 % ймовірності злиття нашої Галактики з М31 протягом наступних 10 млрд років. Певну роль може відігравати не лише правильне визначення модулів відстаней та геометрія орбіти цих систем галактик, але й положення Місцевого Войду поруч із Місцевою Групою галактик та віддаленість Чумацького Шляху від Місцевого Войду. Для вивчення ролі взаємодії з сусідніми (карликовими/нормальними) галактиками в еволюції ЧШ (рис. 11) доступні параметри їхньої ізольованості (проект AMIGA). Наприклад, ізольовані галактики демонструють мультиспектральні властивості, які відмінні від галактик у щільному оточенні та мають слабку світність зокрема в радіо та X- спектральних діапазонах.

**Мультиспектральні дані** для вивчення енергетичного спектрального розподілу (SED) АЧШ-галактик зазвичай збираються в різних оглядах неба, отриманих за допомогою наземних і космічних телескопів. Серед них заслуговують на увагу галактики-близнюки ЧШ. Наприклад, галактика NGC 3521 (рис. 10) є однією з таких ЧШ-близнюків за баріонною масою, швидкістю обертання, масштабною довжиною диска та металічністю.





**Рис. 11.** Найближче оточення Чумацького Шляху (галактики-супутники) в межах області 20 кпк. GAIA posters (2021-2023) [https://gruze.org/posters\\_dr3/](https://gruze.org/posters_dr3/)

Спектральний енергетичний розподіл галактики NGC 3521, змодельований у програмному середовищі SIGALE, подано на рис 1. Для цієї галактики недостатньо даних, щоб побудувати повний SED, зокрема спостережувані дані з українського радіотелескопа УТР-2 у декаметровому діапазоні (РІ НАН України), отримані в 2022 р., у дні буквально напередодні війни, будуть дуже корисними як для побудови повної SED, так і для пояснення деяких особливостей нашої Галактики, таких, як галактичне фонове радіовипромінювання або Північний полярний шпур. Архів радіотелескопа УТР-2 містить великі обсяги даних 24-годинних спостережень для 4-5 позицій NGC 3521 за нахилом.

Цікавий очікуваний результат знаходження вигляду ЧШ для зовнішнього спостерігача може

бути досягнутий при використанні машинного навчання для класифікації за фотометричними параметрами та особливостями зображення (бар та балдж, структура спіральних рукавів, кут нахилу тощо), а також отриманої тривимірної кінематики Чумацького Шляху.

Вибірки кандидатів на роль АЧШ-галактик повинні містити максимально можливу кількість особливостей ЧШ. Це дає змогу оптимізувати необхідні та достатні умови для виявлення галактик АЧШ. Космологічні симуляції TNG50, у свою чергу, дають змогу з'ясувати, які саме єдині/різні еволюційні шляхи призвели до утворення галактик АЧШ.

Людей завжди цікавило, чи є наше місце проживання у Всесвіті особливим, чи існують інші подібні місця. Спочатку були пошуки планет біля інших зір після відкриття перших екзопланет почався пошук планет земної групи та планетних систем, схожих на Сонячну систему. Пошук галактик-аналогів Чумацького Шляху є наступним кроком, що має як фундаментальне, так і світоглядне значення.

Ця робота підтримується Національним фондом досліджень України (проект № 2023.03/0188). ■

**Ірина Вавилова, Дар'я Добричева,  
Анатолій Василенко, Ольга Сергієнко,  
Олена Компанієць** (ГАО НАН України, Київ);  
**Петро Федоров, Артем Дмитренко,  
Владислав Храмов** (НДІ астрономії  
ХНУ ім. В.Н. Каразіна, Харків);  
**Євген Васильківський**  
(РІ НАН України, Харків)

#### Література:

- Boardman, N., Zasowski, G., Seth, A., et al. (2020). Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 491, Is. 3, 3672—3701
- de Vaucouleurs, G., Pence, W. D. (1978). Astron. J., 83, 1163—1173.
- Fedorov, P. N., Akhmetov, V. S., Velichko, A. B., et al. (2023). Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 518, Issue 2, 2761—2774.
- Fraser-McKelvie, A., Merrifield, M., Aragón-Salamanca, A. (2019). Mon. Notic. Roy. Astron. Soc., 489, Is. 4, 5030—5036
- Han, J. J., Conroy, C., Zaritsky, D., et al. (2024). arXiv.2406.12969
- Licquia, T. C., Newman, J. A., Brinchmann, J. (2015). Astrophys. J., 809, Issue 1, article id. 96, 19 p.
- Mutch, S. J., Croton, D. J., Poole, G. B. (2011). Astrophys. J., 736, Is. 2, article id. 84, 11 p
- Naidu, R. P., Conroy, C., Bonaca, A., et al. (2021). Astrophys. J., 923, Is. 1, article id. 92, 24 p
- Pastoven, O.S., Kompaniets, O.V., Vavilova, I.B., Izviekova, I.O. (2024). Space Sci. Technol. 30, No. 6 (151). 10 P.
- Pilyugin, L. S., Tautvaišienė, G., Lara-López, M. A. (2023). Astron. Astrophys., 676, id. A57, 28 p.
- Rix, H.-W., Chandara, V., Zasowski, G., et al. (2024). arXiv.2406.01706
- Sawala, T., Delhomelle, J., Deason, A. J., et al. (2024). arXiv.2408.00064
- Vavilova, I.B., Fedorov P. M., Dobrycheva D. V., et al. (2024). Space Sci. Technol.. 30, No. 4 (149). P. 81—90
- Wylie, S. M., Clarke, J. P., Gerhard, O. E. (2022). Astron. Astrophys., 659, id.A80, 8 p.
- Pastoven, O.S., Kompaniets, O.V., Vavilova, I.B., Izviekova, I.O. (2024). Space Science and Technology. 30, No. 6 (151). 10 P.