

**Національна академія наук України  
Головна астрономічна обсерваторія**

**Вавилова Ірина Борисівна**

**УДК 524.7+52–735**

**АСТРОІНФОРМАТИКА  
ВЕЛИКОМАСШТАБНИХ СТРУКТУР ВСЕСВІТУ**

**01.03.02 – Астрофізика, радіоастрономія**

**Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора фізико-математичних наук**

**Київ – 2020**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Головній астрономічній обсерваторії Національної академії наук України.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник,  
член-кореспондент НАН України  
**Захаренко Вячеслав Володимирович**,  
Радіоастрономічний інститут НАН України,  
директор;

доктор фізико-математичних наук, професор  
**Івченко Василь Миколайович**,  
Київський національний університет імені Тараса  
Шевченка МОН України,  
завідувач кафедри астрономії та фізики космосу;

доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник  
**Мелех Богдан Ярославович**,  
Львівський національний університет імені Івана Франка  
МОН України, завідувач кафедри астрофізики.

Захист відбудеться « 9» липня 2020 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради  
Д 26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії Національної академії  
наук України за адресою:  
м. Київ, 03143, вул. Академіка Заболотного, 27, ГАО НАН України.

Початок засідання о 14 год.

Із дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Головної астрономічної  
обсерваторії НАН України за адресою:  
м. Київ, 03143, вул. Академіка Заболотного, 27, ГАО НАН України.

Автореферат розіслано « 2» червня 2020 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.208.01  
кандидат фізико-математичних наук

І.Е. Васильєва

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Астроінформатика є новим напрямом астрономічних досліджень, який у XXI столітті набуває особливого значення в зв'язку з необхідністю розробки нових математичних методів і засобів обробки великих баз даних мультимедійних спостережень об'єктів Всесвіту, отриманих за допомогою наземних і космічних телескопів. Поява спостережних оглядів позагалактичних джерел випромінювання призвела як до кількісної, так і якісної зміни нашого уявлення про фізичні властивості та характеристики загального розподілу великомасштабних структур Всесвіту (галактики; групи, скупчення і надскупчення галактик; войди; філаменти), про вміст баріонної і темної матерії у Всесвіті, про різноманітність і взаємозв'язок проявів мультимедійних особливостей внутрішніх механізмів генерації енергії у цих структурах та впливу зовнішнього щільного оточення на їх еволюцію.

Лише близько 5 % галактик є ізольованими зоряними системами, – більшість галактик входить до груп (кількістю від двох до декількох десятків членів) або скупчень (до декількох тисяч членів). За даними каталогів галактик і скупчень галактик на відстанях  $r \leq 100h^{-1}$  Мпк кореляційні довжини співвідносяться як  $r_{\text{гал-гал}} = 5h^{-1}$  Мпк і  $r_{\text{ск-ск}} = 25h^{-1}$  Мпк, тобто,  $r_{\text{ск-ск}} \approx 5 r_{\text{гал-гал}}$  (де  $h$  – безрозмірна стала Хаббла). Це означає, що кореляція в розподілі скупчень галактик є продовженням кореляції розподілу галактик на більших масштабах. Неоднорідність розподілу галактик і систем галактик різної населеності (коміркова структура) найповніше проявляє себе на масштабах червоних зміщень  $z < 1$  (див. рис. 1): галактики розташовані на межі комірок у скупченнях; скупчення галактик, малонаселені групи та поодинокі галактики формують надскупчення, які мають сплюснену форму чи являють собою витягнуті ланцюгові структури; мережа надскупчень і скупчень оточує велетенські області, войди, які практично не містять у собі галактик, при цьому окремі з них мають такі ж розміри, як і надскупчення галактик. Зі збільшенням червоного зміщення розподіл видимої матерії стає поступово однорідним та ізотропним.

На сьогодні загальноприйнятим сценарієм еволюції галактик є ієрархічна кластеризація. Той факт, що більшість галактик спостерігається на червоних зміщеннях до  $z \sim 5$ , тоді як найбільш віддалені спостережувані скупчення галактик знаходяться на  $z \sim 2$ , говорить на користь того, що першими формувалися галактики і малонаселені групи, а скупчення галактик, – пізніше, шляхом субкластерного злиття та/або «захоплення» галактик і груп галактик.

Структура Всесвіту на позагалактичних масштабах визначається розподілом і баріонної, і небаріонної матерії, а отже, дослідження неоднорідності розподілу маси, в якій переважає темна матерія (оскільки темна енергія розподілена рівномірно), є ключовим фактором. При дослідженні цієї неоднорідності слід враховувати гравітаційні ефекти: кінематичні характеристики видимої матерії, оскільки її рух дає інформацію про гравітаційну масу; аналіз співвідношення «маса–світність» для галактик, груп і скупчень галактик, що

забезпечує кількісну та якісну інформацію про розподіл речовини в гало; гравітаційно-релятивістські ефекти поширення світла (гравітаційне лінзування) та інші фактори. Сценарій ієрархічної кластеризації добре узгоджується з космологічною  $\Lambda$ CDM-моделлю. Маючи значний успіх у поясненні формування великомасштабної структури Всесвіту в цілому,  $\Lambda$ CDM-модель при цьому стикається із потенційно серйозними проблемами зокрема щодо обґрунтування темних гало окремих галактик і скупчень галактик, статистики розподілу галактик різних морфологічних типів у широкому діапазоні червоних зміщень, еволюційних закономірностей у властивостях малонаселених груп і скупчень галактик, відсутності даних про великомасштабну структуру Всесвіту за Зоною уникання Галактики.

Сучасний астроінформаційний ресурс і віртуальне середовище архівів спостережних даних надають потужні засоби для постановки програм і вирішення різноманітних завдань дослідження великомасштабних структур Всесвіту. У дисертації основна увага сконцентрована на виборі і верифікації тих математичних методів видобутку знань, які дозволили ефективно їх застосувати для вирішення таких завдань: 1) встановлення критеріїв ізольованості галактик і малонаселених груп галактик та визначення вмісту темної матерії в них на червоних зміщеннях  $z < 0.1$ ; 2) визначення мультимасштабних властивостей ізольованих галактик із активними ядрами на масштабах близького Всесвіту ( $z < 0.1$ ) і виокремлення ефектів впливу оточення на внутрішні процеси в галактиках; 3) проведення автоматичної морфологічної класифікації галактик на  $z < 0.1$  і розробка алгоритмів відтворення просторового розподілу галактик за Зоною уникання Галактики; 4) отримання параметричної залежності «розмір гало темної матерії – повна маса» скупчень галактик і залежності між світністю, температурою і масою міжгалактичного газу скупчень на еволюційній шкалі  $z < 1.4$ ; 5) перевірка сценаріїв формування й еволюції галактик.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження виконувалися під час роботи здобувача в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка та від 2008 року по теперішній час у Головній астрономічній обсерваторії НАН України за такими програмами і темами:

відомчі теми НАН України «Великомасштабна структура Всесвіту за даними багатохвильових оглядів окремих її складників» (№ держ. реєстрації 0119U000393, 2019–2023 рр., науковий керівник), «Чисельний аналіз фізичних характеристик і еволюції скупчень галактик, галактик і галактичних підсистем» (№ держ. реєстрації 0113U008323, 2014–2018 рр., науковий співкерівник), «Розвиток та застосування кластерних технологій для мультимасштабного динамічного моделювання та аналізу структури локального Всесвіту» (№ держ. реєстрації 0110U007860, 2011–2013 рр., відповідальний виконавець); бюджетна тема Київського національного університету імені Тараса Шевченка «Великомасштабна структура Всесвіту і характеристики позагалактичних об'єктів» (№ держ. реєстрації 0101U000996, 2001–2005 рр., виконавець);

цільова комплексна програма НАН України з наукових космічних досліджень: у межах науково-дослідних робіт «Новітні методи та нові знання про будову матерії у Всесвіті: опрацювання та наповнення бази даних рентгенівських космічних місій. Етап 1 «Обробка та інтерпретація даних вибраних позагалактичних рентгенівських джерел» (№ держ. реєстрації 0118U004071, 2018 р., науковий керівник), «Створення Астрокосмічного центру обробки даних для вирішення задач багатохвильової астрофізики» (№ держ. реєстрації 0117U002607, 2017 р., 0116U006441, 2016 р., 0115U003789, 2015 р., 0115U002054с, 2014 р., науковий керівник), «Розподіл матерії на близьких і космологічних масштабах Всесвіту та створення інтерактивних інструментів його візуалізації» (№ держ. реєстрації 0113U005484с, 2013 р., науковий керівник);

цільова комплексна програма НАН України «Астрофізичні і космологічні проблеми прихованої маси і темної енергії Всесвіту» (шифр «Космомікрофізика-2»), у межах науково-дослідних робіт «Властивості ізольованих галактик з активними ядрами і оцінка мас їх центральних чорних дір» (№ держ. реєстрації 0113U008053, 2013 р., науковий керівник), «Властивості баріонної і небаріонної матерії в галактиках і скупченнях галактик» (№ держ. реєстрації 0112U004455, 2012 р., науковий керівник) і «Астрофізичні прояви темної матерії» (№ держ. реєстрації 0110U003747, 2010–2011 рр., науковий керівник); цільова комплексна програма НАН України «Дослідження структури та складу Всесвіту, прихованої маси і темної енергії» (шифр «Космомікрофізика»), у межах науково-дослідної роботи «Спостережні прояви баріонної і небаріонної компонент матерії» (№ держ. реєстрації 0107U009720, 2007–2009 рр., виконавець);

цільова тема відділення фізики і астрономії НАН України «Фундаментальні властивості об'єктів Всесвіту: теоретичні та спостережні аспекти» (№ держ. реєстрації 0112U001007, 2012–2016 рр., виконавець);

науково-технічний проект (конкурсна тематика НАН України) «Тестування та впровадження програмно-математичного забезпечення вимірювань параметрів руху космічних апаратів і малих небесних тіл для завдань контролю космічного простору та навколосемної астрономії» (№ держ. реєстрації 0118U001830, 2018 р., відповідальний виконавець);

наукові проекти Державного фонду фундаментальних досліджень України «Популяція галактик в близьких космічних лакунах» (№ держ. реєстрації 0113U004477, 2013 р., виконавець), «Просторовий розподіл та фізичні властивості галактик в областях з екстремально низькою густиною матерії» (№ держ. реєстрації 0111U006527, 2011–2012 рр., виконавець), «Створення нових каталогів ізольованих галактик» (№ держ. реєстрації 0109U006142, 2009–2010 рр., виконавець); проект УНТЦ № 43 «Фундаментальна фізика та астрофізика на борту МКС: теоретичні основи для перевірки ЗТВ та астрономічне забезпечення спостережної програми з астероїдної небезпеки» (2003–2004 рр., науковий керівник).

**Метою дисертаційної роботи є визначення фізичних властивостей і еволюційних залежностей між головними характеристиками великомасштабних структур Всесвіту (морфологія, кінематика, вміст темної і видимої матерії,**

просторовий розподіл галактик і їх систем) на червоних зміщеннях  $z < 1.4$  шляхом розробки, верифікації та застосування математичних методів із використанням астроінформаційного ресурсу великих баз даних мультихвильових спостережень.

**Відповідно до поставленої мети були запропоновані і вирішені такі завдання:**

- Аналіз наявних математичних методів досліджень просторового розподілу галактик, створення нових алгоритмів та верифікація обраних методів для виокремлення систем галактик різної населеності.
- Дослідження фізичних властивостей ізольованих галактик і малонаселених груп галактик з огляду SDSS, виокремлених методом мозаїки Вороного; порівняння отриманих властивостей із властивостями груп Місцевого надскопчення та отримання співвідношення «маса–світність».
- Автоматична морфологічна класифікація галактик огляду SDSS із застосуванням методів машинного навчання та урахуванням надійності встановлених фотометричних критеріїв класифікації за параметрами, які найбільше корелюють з морфологією галактик.
- Розробка нових алгоритмів відтворення просторового розподілу великомасштабної структури Всесвіту за Зоною уникання Галактики.
- Комплексне дослідження мультихвильових властивостей ізольованих галактик з активними ядрами на  $z < 0.1$  за даними каталогу 2MIG (кінематика, спектральні особливості, маси надмасивних чорних дір).
- Визначення вмісту темної матерії та розподілу баріонної і темної матерії в групах і скупченнях галактик за даними мультихвильових оглядів неба, отриманих за допомогою наземних і космічних телескопів.
- Систематизація астроінформаційного ресурсу досліджень великомасштабних структур Всесвіту (каталоги, архіви, бази даних галактик і скупчень галактик, віртуальні обсерваторії).
- Створення Української віртуальної обсерваторії, у т.ч. Об'єднаного цифрового архіву астронегативів, для досліджень небесних тіл Галактики.

**Об'єкти дослідження:** галактики на червоних зміщеннях  $z < 0.1$ , скупчення галактик на  $z < 1.4$  (бази даних SDSS, 2MASS, NED, HyperLEDA, Chandra, XMM-Newton та інші; каталоги галактик і скупчень галактик), Зона уникання Галактики, великомасштабна структура Всесвіту.

**Предмет дослідження:** морфологічні, фотометричні, спектральні, кінематичні і динамічні властивості галактик Місцевого Всесвіту в залежності від оточення; розподіл баріонної і темної матерії в малонаселених групах і скупченнях галактик; галактики з активними ядрами; сценарії формування та еволюції галактик у Всесвіті.

**Методи досліджень:** 2D- і 3D-методи мозаїки Вороного для просторового розподілу великомасштабних структур Всесвіту, методи машинного навчання, автоматична морфологічна класифікація галактик, фрактальний аналіз, технології обробки даних у віртуальному середовищі, статистичні методи (критерій максимальної правдоподібності,  $f$ -критерій Фішера, тест Колмогорова–

Смирнова,  $k$ -кратна перевірка), порівняння змодельованих характеристик зі спостережуваними даними.

### Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше запропоновано та доведено ефективність застосування розробленого методу мозаїки Вороного вищих порядків для встановлення критеріїв ізольованості великомасштабних структур Всесвіту і виявлення просторового розподілу галактик на масштабах малонаселених груп.

Вперше визначено вміст темної матерії малонаселених груп галактик огляду SDSS та Місцевого надскупчення, виділених методом мозаїки Вороного, за співвідношенням «маса–світність»:  $12 M_{\odot}/L_{\odot}$  і  $44 M_{\odot}/L_{\odot}$  для ізольованих пар і триплетів,  $7(8) M_{\odot}/L_{\odot}$  для компактних пар (триплетів) галактик огляду SDSS;  $34 M_{\odot}/L_{\odot}$  для груп від 4 до 10 галактик Місцевого надскупчення. Отримано їхні кінематичні/морфологічні параметри і показано, що чим компактніше система галактик, тим більше темна матерія асоціюється з загальним гало системи.

Вперше виконано комплексне дослідження мультихвильових властивостей 2MIG ізольованих галактик із активними ядрами (АЯГ) на масштабах близького Всесвіту. Показано, що для більшості з них енергетичні параметри у всіх спектральних діапазонах значно менші за параметри галактик, що знаходяться у щільному оточенні, у т.ч. меншими є маси їхніх центральних надмасивних чорних дір (від  $1.2 \times 10^5$  до  $8 \times 10^5 M_{\odot}$ ). Це свідчить на користь ієрархічного сценарію еволюції галактик і доводить, що ізольовані галактики є надійним стандартом вивчення внутрішніх фізичних процесів у галактиці без впливу оточення. Показано, що всі 2MIG ізольовані АЯГ типу Sy1 (без слабких супутників) мають морфологічні ознаки перемички, – отже, перемичка має вирішальне значення для існування області широких емісійних ліній і є достатньою умовою для передачі газу та пилу з диска галактики в область активного ядра. Для окремих АЯГ вибірки вперше отримано їхні характеристики в X-діапазоні за новими спостережними даними обсерваторій XMM-Newton, Swift, Chandra і NuSTAR.

Виконано оцінки розподілу темної і баріонної матерії для 129 X-скупчень галактик за даними космічної обсерваторії Chandra, отримано залежність «параметр концентрації (розмір гало темної матерії) – повна маса» і значення мас для газового компонента ( $\sim 12\text{--}14\%$ ), найяскравішої галактики ( $\sim 1\text{--}3\%$ ) та гало темної матерії ( $\sim 85\%$ ). Виявлено, що профілі густини темної матерії для  $\sim 70\%$  досліджуваних скупчень галактик на  $0.01 < z < 1.4$  узгоджуються з  $\Lambda$ CDM-моделлю.

Вперше за даними обсерваторій Chandra і XMM-Newton проаналізовано параметричні залежності між світністю  $L_X$ , температурою  $T_X$  і масою  $M_g$  міжгалактичного газу 22 X-скупчень галактик у еволюційному аспекті на шкалі відстаней  $0.4 < z < 1.4$ . У припущенні, що еволюція в співвідношеннях  $M-L$  і  $M-T$  для баріонної і темної матерії однакова, отримано залежності  $M_g \sim (1+z)^{-1.9} \times L_X^{0.73}$  та  $L_X \sim (1+z)^{1.5} \times T^{2.55}$ , що свідчить про значиму еволюцію маси міжгалактичного газу і світності скупчення у порівнянні з кореляціями цих характеристик для близьких скупчень галактик.

Розроблено нові алгоритми застосування методів машинного навчання а) для проведення автоматичної морфологічної класифікації галактик SDSS на  $0.02 < z < 0.06$ , де вперше отримано найкращу статистичну значимість встановлення бінарної класифікації галактик методом випадкового лісу і методом опорних векторів ( $95.5 \pm 0.03$  % і  $96.4 \pm 0.06$  відповідно); б) для відтворення просторового розподілу галактик за Зоною уникання Галактики, де вперше показано, що метод відновлення пошкоджених тривимірних зображень та генеративні змагальні нейронні мережі здатні відтворювати його за наявності даних про модулі відстаней у крайових ділянках Зони уникання.

Розроблено концепцію та сформовано наукові проекти Української віртуальної обсерваторії (УкрВО), результати яких увійшли до міжнародних баз даних. У рамках УкрВО впроваджено оригінальні методи пошуку оптичних аналогів гамма-спалахів і створення каталогів «поля зір» навколо положень їх ідентифікації з використанням даних Об'єднаного цифрового архіву астронегативів УкрВО, визначення орієнтації проєктованих на небесну сферу систем галактик, обробки ПЗЗ-зображень з метою отримання положень небесних об'єктів у автоматичному режимі під час спостережень, обробки зображень Х-скупчень галактик для подальшого вивчення розподілу густини баріонної і темної матерії в них.

**Практичне значення одержаних результатів.** Запропоновані і розвинуті у роботі математичні методи досліджень розподілу галактик і їхніх угруповань, методи обробки великих масивів даних оглядів неба, методи обробки спектрів і зображень галактик показали свою ефективність у вивченні фізичних властивостей великомасштабних структур Всесвіту, були використані зокрема у дисертаційних дослідженнях, виконаних під керівництвом здобувача, та є основою нових наукових відомчих тем і конкурсних проєктів із позагалактичної астрономії та астроінформатики.

Показником практичного застосування результатів є їхнє відображення у навчальних підручниках для студентів вищих навчальних закладів України [43, 44, 46], у монографіях [27, 42, 47], як і цитування статей здобувача, у т.ч. іноземними науковцями. Створені вибірки позагалактичних об'єктів, описані в роботах [1, 11, 19], увійшли до міжнародних баз даних [28, 29] і використовуються для перевірки теоретичних моделей формування та еволюції галактик і їх систем. Об'єднаний цифровий архів астронегативів УкрВО, що охоплює результати астрономічних спостережень від кінця XIX ст. до 2000-х рр., використовується для створення нових каталогів (окремі з них описано в роботі [41]) та постановки нових досліджень і суттєво доповнює світову мережу оцифрованих астронегативів завдяки своїй унікальності.

Результати дослідження використовуються в астрономічних організаціях України (астрономічні установи національних університетів в Києві, Львові, Одесі, Харкові; Радіоастрономічний інститут НАН України, Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України, Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, Кримська астрофізична обсерваторія, Миколаївська астрономічна обсерваторія та інші) і за



кордоном (окремі астрономічні установи в Бельгії, Іспанії, Італії, Канаді, Китаї, Латвії, Німеччині, Польщі, Росії, США, Таїланді, Таджикистані, Узбекистані та інших країнах), у спільних міжнародних проектах, а висловлені рекомендації набувають розвитку в нових науково-дослідних роботах, у т. ч. дисертаційних.

Робота «Будова та еволюція Всесвіту на галактичних та космологічних масштабах, прихована маса і темна енергія: теоретичні моделі та спостережні результати» (автори Берцик П.П., Вавилова І.Б., Жданов В.І., Жук О.І., Караченцева В.Ю., Мінаков А.О., Новосядлий Б.С., Павленко Я.В., Пелих В.О., Пілюгін Л.С.) отримала Державну премію України в галузі науки і техніки за 2014 рік. Монографія «Dark Energy and Dark Matter in the Universe» у трьох томах, де том 3 «Dark matter: Observational manifestation and experimental searches» [27] підготовлено за участі здобувача, визнана переможцем у категорії «Basic Science Book Awards» Міжнародної академії астронавтики у 2016 р. (<https://iaaweb.org/content/view/144/244/>).

Проведені дослідження з постановки завдань Об'єднаного цифрового архіву астронегативів і організації УкрВО стали основою входження УкрВО до Міжнародного альянсу віртуальних обсерваторій (IVOA) у 2011 р. Співробітництво з IVOA не лише сприяє кооперації досліджень у розвитку новітніх астроінформаційних технологій, а й передбачає участь у розподілі обов'язків у спільних міжнародних завданнях, розроблення і виконання нових проектів на національному рівні. Зокрема у 2014 р. наукова робота «Українська віртуальна обсерваторія» (Вавилова І.Б., Пакуляк Л.К., Процюк Ю.І.) була відзначена премією НАН України імені Є.П. Федорова.

**Достовірність та обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій.** Достовірність отриманих результатів підтверджено перевіркою отриманих чисельних результатів методом випадкового процесу (метод Монте-Карло), статистичним тестом Колмогорова–Смирнова та методом перехресної перевірки (*k*-folds validation). Обґрунтованість наукових положень підтверджено публікацією результатів у рецензованих фахових журналах і матеріалах міжнародних конференцій та посиланнями на ці статті іншими авторами.

#### **Особистий внесок здобувача.**

Роботи [14, 15, 34–36] виконані одноосібно.

Дослідження зі встановлення розподілу темної матерії в скупченнях і групах галактик узагальнено в англomовній монографії [27], де автору належить участь у підготовці та написанні розділу 2 «Dark matter: observational manifestation in galaxy clusters» і розділу 4 «Dark and baryonic matter distribution in the sparsely populated galaxy groups», упорядкування та редагування всього тому монографії.

У роботах [4, 6, 8–10, 21, 32, 38, 39] автору належить ідея використання та подальшого впровадження двовимірного і тривимірного методів мозаїки Вороного для виявлення малонаселених систем галактик у загальному розподілі галактик Місцевого надскупчення і вибірки галактик із огляду SDSS, участь у розробці модифікованого математичного методу та алгоритму коду для подальшого встановлення фізичних властивостей цих систем (ізолювані галактики,

пари і триплети галактик) та перевірки сценаріїв формування й еволюції галактик; участь у постановці завдань, обговоренні результатів, підготовці огляду літератури та написанні статей, для англomовних статей – у більшості з них написання англomовного варіанту текстів робіт. Окрім цього, у роботах [38, 39] – узагальнення критеріїв використання методу для двовимірних і тривимірних розподілів галактик; [10] – аналіз розподілу темної матерії в гало галактик малонаселених груп; [6, 8] – аналіз параметрів комірок Вороного для встановлення критеріїв виокремлення ізольованих, пар і триплетів галактик і структури Місцевого надскоупчення; [9, 21] – статистичні оцінки вибору критеріїв ізольованості малонаселених груп галактик та участь у проведенні розрахунків для отримання співвідношення «маса–світність»; [4] – вибір параметрів та оцінка впливу оточення (включно для аналізу ефекту Хольмберга для пар галактик).

У роботі [20] автор брала участь у постановці завдання, аналізі кінематичних і віріальних параметрів триплетів галактик, написанні статті.

У роботах [5, 7, 17, 31] представлено результати застосування методів машинного навчання для визначення морфологічної автоматичної класифікації галактик і відтворення просторового розподілу галактик за Зоною уникання Галактики. У цих роботах автор брала участь у постановці завдань, обговоренні результатів та написанні статей. Окрім того, автор висунула ідею та розробила алгоритм відтворення (латання) просторового розподілу галактик за Зоною уникання із застосуванням методів машинного навчання [17], брала участь у дискусії щодо точності обраних методів машинного навчання та критеріїв їхньої верифікації [31], обґрунтуванні вибору параметрів галактик з огляду SDSS для подальшої автоматичної морфологічної класифікації [5] та в розробці критеріїв морфологічної класифікації за фотометричними параметрами галактик огляду SDSS [7].

Роботи [22–25] стали основними у становленні Української віртуальної обсерваторії, компоновці об'єднаного архіву спостережних даних УкрВО та постановці завдань досліджень з використанням Об'єднаного цифрового архіву астронегативів, позиційних даних ПЗЗ-спостережень та даних спектральних спостережень небесних об'єктів, виконаних в обсерваторіях України від 1890-х років. Автору належить вирішальна роль у розробці мети, концепції і постановці завдань УкрВО, представлених у цих статтях, дослідженні астроінформаційного ресурсу УкрВО, участь у обговоренні результатів і написанні статей. У роботі [41] представлено основні результати зі створення каталогів зір і галактик, отриманих із використанням баз даних УкрВО і VIRGO (Virtual Roentgen Gamma Observatory), можливості веб-серверів цих віртуальних обсерваторій, у розробці яких автор брала участь.

Запропоновані методи обробки 2D-зображень небесних об'єктів та їхньої ідентифікації в автоматичному режимі спостережень подано в роботах [12, 13], де автору належить участь у розробці математичних методів і аналізі результатів тестування методів, а також написання англomовної версії статті [12]. У роботі [18] автору належить удосконалення методики пошуку оптичних аналогів гамма-сплесків на оцифрованих астронегативах УкрВО. У роботі [16]

автору належить порівняння методів обробки рентгенівських спектрів скупчень галактик з метою можливого виявлення субструктур галактик у них та алгоритм застосування хвилькового аналізу. У всіх цих роботах автор брала участь у постановці завдань, дискусії щодо отриманих результатів та написанні статей.

У роботах [11, 19, 26, 30, 33, 37, 40] автору належить ідея і постановка комплексного дослідження мультихвильових властивостей ізольованих галактик із активними ядрами у близькому Всесвіті, участь у формуванні вибірки галактик з активними ядрами з каталогів [53, 65] та розрахунках параметрів цих об'єктів у різних спектральних діапазонах, аналізі отриманих результатів, написанні статей і підготовці вибірки окремих із досліджуваних галактик для бази даних NASA/IPAC (NED) [29].

У роботах [1–3] подано дослідження вмісту темної і баріонної матерії в X-скупченнях галактик, у яких автор брала участь у постановці завдань і написанні статей, а також аналізі отриманих результатів за допомогою нового методу урахування баріонного компонента (внеску найяскравішої галактики скупчення) та отриманні еволюційних співвідношень «світність–температура–маса газу» X-скупчень галактик на шкалі відстаней  $z < 1.4$ . Робота [28] є електронним каталогом вибірки скупчень галактик, представленої у VizieR Online Data Catalogue.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати доповідалися й обговорювалися на таких конференціях:

симпозіуми Міжнародного астрономічного союзу: IAUS 186 «Galaxy Interactions at High and Low Redshift» (Киото, Японія, 1997); IAUS 196 «Preserving the Astronomical Sky» (Відень, Австрія, 1999); IAUS 235 «Galaxy Evolution Across the Hubble Time» та IAUJD «Nomenclature, Precession and New Models in Fundamental Astronomy» (Прага, Чехія, 2006); IAUS 290 «Feeding Compact Objects: Accretion on All Scales» (Пекін, Китай, 2012); IAU meeting ACRIM2014 (Теджон, Південна Корея, 2014); IAUS 308 «The Zeldovich Universe Genesis and Growth of the Cosmic Web» (Таллінн, Естонія, 2014); IAUS 325 «Astroinformatics» (Сорренто, Італія, 2016); IAUS 347 «Early Science with ELTs (EASE)» та IAUS 348 «21st Century Astrometry: crossing the Dark and Habitable frontiers» (Відень, Австрія, 2018);

симпозіуми Європейського астрономічного товариства: JENAM1997 (Салоніки, Греція, 1997); JENAM2003 Symposia «Gravitational Astrophysics» та «Astronomy education in Europe» (Будапешт, Угорщина, 2003); JENAM2004 Symposium «The many scales in the Universe» (Гранада, Іспанія, 2004); JENAM2008 «New challenges to European Astronomy» (Відень, Австрія, 2008); JENAM2011 Special Session «Science with the Virtual Observatory» (Санкт-Петербург, Росія, 2011); EWASS2013 Symposium «The co-evolution of black holes and galaxies» (Турку, Фінляндія, 2013); EWASS2017 Symposium «Astroinformatics: From big data to understanding the Universe» та «Relativity at 100» (Прага, Чехія, 2017); EWASS2019, SS33 «Learning the Milky Way: Artificial Intelligence Applications from Solar System to Galaxy Scales», SS34 «Understanding data: Visualisation, machine learning, and reproducibility» (Ліон, Франція, 2019);

симпозіуми КОСПАР: 35th COSPAR Scientific Assembly (Париж, Франція, 2004); 36th COSPAR Scientific Assembly (Пекін, Китай, 2006); 38th COSPAR Scientific Assembly (Бремен, Німеччина, 2010); 39th COSPAR Scientific Assembly (Майсур, Індія, 2012); симпозіум «Planetary systems of our Sun and other stars, and future of space astronomy» (Бангкок, Таїланд, 2013);

Українська конференція з космічних досліджень (Київ, 2003; Понизівка, Крим, 2004; Євпаторія, Крим, 2011, 2012; Ужгород, 2014; Одеса, 2015, 2016);

міжнародні конференції в Україні: «Astronomy in Ukraine – 2000 and beyond» (Київ, 2000); «Voronoi conference on analytic number theory and spatial tessellations» (Київ, 2003, 2018); «Astronomy and Space Physics in Kyiv University» (Київ, 2005, 2010, 2011, 2012, 2014, 2019); «Methods and Instruments in Astronomy: From Galileo Telescopes to Space Projects» (Миколаїв, 2010); «Astronomical research: from Near-Earth Space to the Galaxy» (Миколаїв, 2011); «Space Technologies: Present and Future» (Дніпро, 2015, 2017, 2019); «Проблеми сучасної астрономії та методики її викладання» до 100-річчя від дня народження Й.С. Шкловського (Глухів, 2016); IV, IX, X, XII–XVIII міжнародні Гамовські конференції-школи «Astronomy and beyond: astrophysics, cosmology and gravitation, cosmomicrophysics, radio astronomy and astrobiology» (Одеса, 2004, 2009–2010, 2012–2019);

міжнародні конференції за кордоном: «Astronomical Data Analysis Software and Systems VI» (Шарлотсвілл, США, 1996); Fifth Workshop «Data Analysis in Astronomy» (Ериче, Італія, 1996); симпозіум «Mysterium Cosmographicum 1596-1996» (Прага, Чехія, 1996); «Galaxy Clustering» (Марсель, Франція, 1999); Ninth UN/ESA Workshop on Basic Space Sciences (Тулуза, Франція, 2000); ВАК-2004 «Горизонты Вселенной» (Москва, Російська Федерація, 2004); 13<sup>th</sup> International conference «Women in engineering and science» (Сеул, Південна Корея, 2005); Всероссийская астрофизическая конференция «Астрофизика высоких энергий: сегодня и завтра» (Москва, Російська Федерація, 2012); «Astroplate I» і «Astroplate III» (Прага, Чехія, 2014; Бамберг, Німеччина, 2019); ESO Conference «Active Galactic Nuclei: what's in a name?» (Гархінг, Німеччина, 2016); International Workshop «Dark Matter and Stars» (Лісабон, Португалія, 2018).

Результати обговорювалися на семінарах і нарадах: семінари в ГАО НАН України, Радіоастрономічному інституті НАН України, Астрономічній обсерваторії КНУ імені Тараса Шевченка, Інституті астрономії ХНУ ім. В.Н. Каразіна, Астрономічній обсерваторії ОНУ ім. І.І. Мечникова; семінари в Мерілендському університеті (Меріленд, США, 1998), Університеті імені Яна Кохановського (Кельце, Польща, 1998); австрійсько-український семінар з астрофізики і космічних досліджень (Відень, Австрія, 1999); нарада з цільової програми НАН України «Астрофізичні і космологічні проблеми прихованої маси і темної енергії Всесвіту» (Київ, Інститут ядерних досліджень НАН України, 2012); IVOA InterOP робоча нарада (Гайдельберг, Німеччина, 2013); друга українсько-італійська нарада «Multiwavelength astrophysics from radio to gamma-rays» (Харків, ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2018); китайська-українська-латвійська нарада з астрометрії (Шанхай, Китай, 2019).

**Публікації за темою дисертації.** Основні результати дисертаційного дослідження відображено в 41 науковій публікації, а саме: в 26 статтях у реферованих фахових журналах, у одній англomовній монографії, в 12 статтях, опублікованих у реферованих матеріалах міжнародних конференцій та інших виданнях, і в двох електронних онлайн-каталогах, наявних в базах даних NASA/IPAC Extragalactic Database та VizieR Online Data Catalogue.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація містить вступ, сім розділів, висновки, список літератури і два додатки. Робота викладена на 388 сторінках, містить 23 таблиці, 49 рисунків та 518 найменувань у списку літератури.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Вступ.** У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, визначено мету та основні завдання, описано методи, які необхідні для розв'язання завдань, а також вказано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, відмічено особистий внесок автора і рівень апробації результатів.

У розділі 1 «Астроінформаційний ресурс досліджень великомасштабної структури Всесвіту» проаналізовано спостережні огляди неба, каталоги, бази даних і архіви галактик, отримані за допомогою наземних і космічних телескопів у всьому діапазоні електромагнітного спектру.

Найбільше уваги приділено каталогам і базам даних в оптичному і ближньому інфрачервоному діапазонах, у т.ч. в історичній ретроспективі розвитку засобів отримання астроінформації (підрозділ 1.1): від перших фотографічних і спектральних до сучасних цифрових оглядів неба з використанням ПЗЗ-матриць (п.п. 1.1.1–1.1.3); окремо розглянуто важливість оцифрування фотографічних і спектрофотометричних астронегативів та концепцію віртуальних обсерваторій (п. 1.1.4). Огляди і бази даних позагалактичних джерел у інших діапазонах електромагнітного спектру систематизовані в підрозділі 1.2; об'єднані бази даних позагалактичних джерел подано в підрозділі 1.4. Використання таких даних дозволяє отримувати мультитимплові властивості галактик для комплексного розуміння фізичних процесів, які відбуваються в них (диск, акреційний диск, ядро, джети, балдж і спіральні рукави галактик, міжзоряне середовище). Багатоканальна астрономія охарактеризована в п. 1.3.

У підрозділі 1.5 робиться висновок щодо шляхів розвитку астроінформатики як нового напрямку досліджень та щодо важливості розробки нових математичних методів і підходів до обробки накопиченого на сьогодні обсягу спостережних даних для видобутку нових знань про властивості як окремої галактики, так і великомасштабної структури (ВМС) Всесвіту в цілому (див. рис. 1, на якому подано розподіл галактик за даними огляду SDSS на  $z < 0.1$ ).

У розділі 1 серед інших джерел використано роботи зі списку основних публікацій [15, 19, 25, 27] та роботи [43, 46, 64] автора дисертації. Список посилань на каталоги і бази даних подано в додатку 1.

У розділі 2 «Галактика. Астроінформаційний ресурс Української віртуальної обсерваторії» охарактеризовано концепцію віртуальних обсерва-

торій (підрозділ 2.1) як нову інформаційну технологію в астрономії, що виникла в результаті безпрецедентного прискорення темпів накопичення науково значущих астрономічних даних, отриманих за допомогою наземних і космічних телескопів. Бази даних мають свої віртуальні середовища для формату подання, зберігання й обміну інформацією, як і спеціалізовані програмні продукти первинної обробки спостережень.

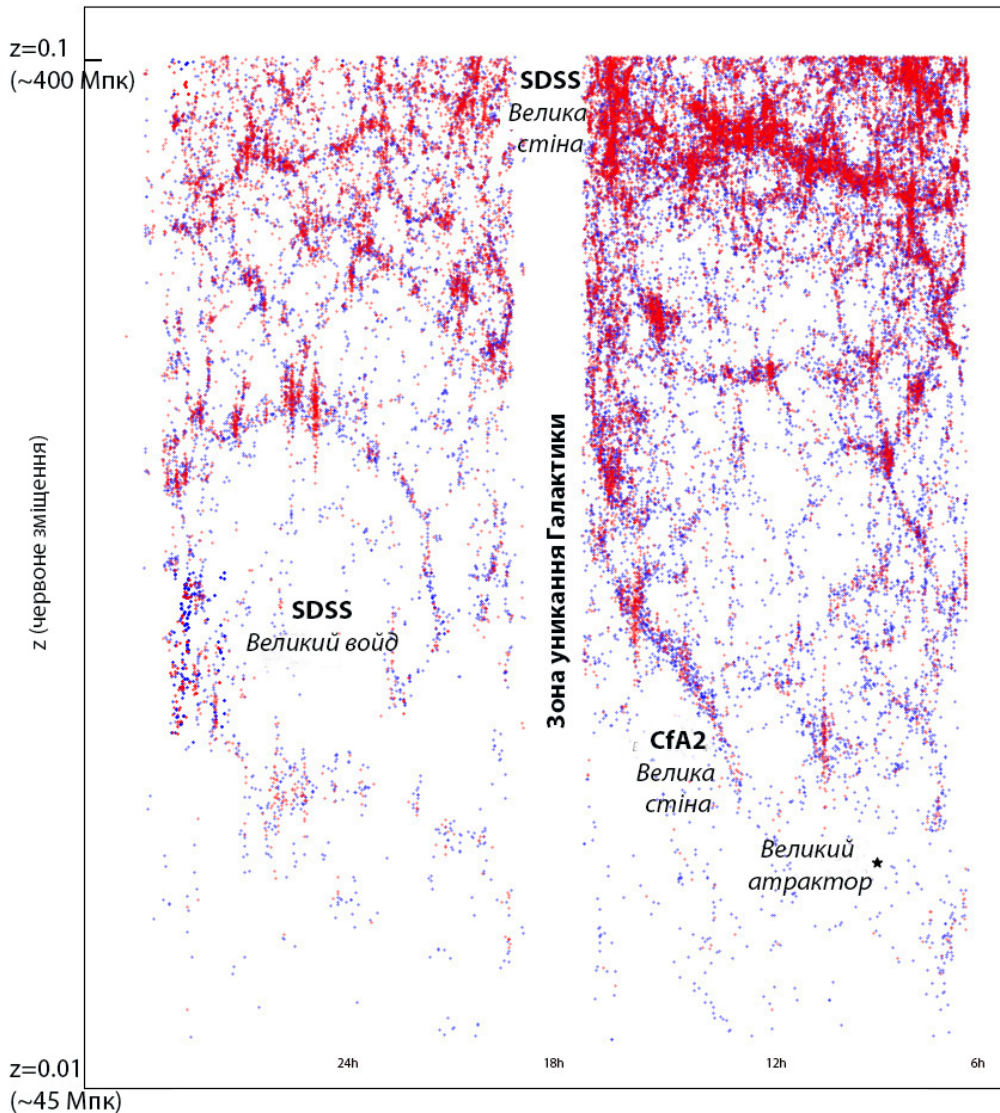


Рис. 1. 2D-розподіл 48 651 галактики з огляду SDSS DR9 на відстанях 45÷400 Мпк ( $0.02 < z < 0.1$ ,  $\alpha = 0^h \div 24^h$ ,  $\delta = \pm 5^\circ$ ). Червоний колір – еліптичні і лінзоподібні галактики (E – S0a,  $N = 24\,916$ ); блакитний – спіральні й іррегулярні галактики (Sa – Irr,  $N = 23\,735$ ). Позначено декілька інших великомасштабних структур (SDSS Велика стіна, SDSS Великий вийд, CfA2 Велика стіна, Великий атрактор) і Зону уникання Галактики [64]

У той же час за більш ніж столітню історію спостережень на наземних телескопах у обсерваторіях світу, у т.ч. України, накопичені архіви даних, часто недоступні через розосередженість та розрізненість астроінформації, так і відсутність цього матеріалу в оцифрованому вигляді в єдиному віртуальному середовищі. З цією метою була створена Українська віртуальна обсерваторія

(УкрВО), частиною якої став Об'єднаний цифровий архів астронегативів і спектральних спостережень (ОЦА) для дослідження небесних тіл Галактики [24]. У підрозділі 2.2 охарактеризовано наукові завдання, проекти та віртуальні інструменти, розроблені для УкрВО [15, 22, 23, 25]. Вся інформація, включно з публікаціями авторів проектів, подається на сайті <http://ukr-vo.org>. Дані ОЦА УкрВО доступні й оновлюються на веб-сайті <http://ukr-vo.org/digarchives/index.php?b1&1>.

Підрозділ 2.3 охоплює методи обробки двовимірних зображень небесних об'єктів та віртуальні технології, розвинуті за участі автора дисертації. Так, обговорюється створення ОЦА УкрВО за міжнародними стандартами як віртуального середовища даних для досліджень небесних тіл Галактики [18, 23, 41, 62]. ОЦА базується на астронегативах (~250 тис. пластинок) і спектральних спостереженнях (понад 50 тис. у фотографічному форматі або на пластинках), накопичених в обсерваторіях України. За програмою «Фотографічний огляд неба» (ФОН, 1985–2000 рр.) отримано найбільше астронегативів, які повністю оцифровані за допомогою спеціального програмно-математичного забезпечення LINUX/MIDAS/ROMAFOT, розробленого В.М. Андруком у ГАО НАН України. Цей архів використовується не тільки з астрометричною метою складання оцифрованого «Фотографічного огляду неба» (координати і власні рухи зір до  $16^m$  видимої зоряної величини у В-смузі, розсіяні скупчення), а і для пошуку/уточнення положень небесних тіл Сонячної системи та ототожнення положень оптичних аналогів гамма-спалахів (п. 2.3.1). Ототожнення здійснюється на оцифрованому зображенні площадки неба в колі з радіусом до  $10'$  від точки екваторіальних координат, де зареєстровано гамма-спалах, – це коло формує майбутній список поля зір, «star field» [18, 41]. Позиційна точність координат зір становить між  $\pm 0.3''$  та  $\pm 4.5''$ , а діапазон В-величин від  $14^m$  до  $19^m$ , похибки  $\sigma_\alpha = \pm 0.17''$ ,  $\sigma_\delta = \pm 0.3''$ ,  $\sigma_m = \pm 0.3$  відповідно. Оскільки оптичні аналоги гамма-спалахів досить слабкі, використовуються лише астронегативи з часом експозиції більше 10 хвилин (практично, всі вони з архіву програми ФОН). На сьогодні проаналізовано координати 108 гамма-спалахів, зареєстрованих у 2003, 2009–2013 рр. Для уточнення параметрів зір та розмірів поля зір навколо гамма-спалаху використовується огляд неба DSS2 (Digital Sky Survey) та веб-сервіс Aladin.

У п. 2.3.2 описано математичні методи для автоматичної реєстрації небесних тіл на ПЗЗ-кадрах, які увійшли в програмно-математичне забезпечення CoLiTec (Collection Light Technology <http://colitec.neoastrosoft.com/en/>) і в розробці яких автор брала участь. Запропоновано метод ітерації для оцінки координат небесних тіл, який працює з координатами як із безперервними параметрами у дискретному просторі набору потенціалів пікселів ПЗЗ-матриці [12]. Висока точність вимірювання зумовлена запровадженням так званої підпіксельної моделі Гаусса (subpixel Gaussian model). Ця модель зображення враховує попередню форму зображення небесного об'єкта, а отже, вона більш гнучко пристосована до будь-якої форми перетворення зображення. Пере-

вагами підпиксельної моделі Гаусса є її ефективне застосування для слабких небесних об'єктів (співвідношення сигнал-шум  $\sim 2.5$ ).

Другий із обчислювальних методів стосується виявлення близьконульових видимих рухів об'єкта на серії ПЗЗ-кадрів і базується на критерії значимості фактора швидкості видимого руху досліджуваного об'єкта [13]. В якості такого критерію використовується  $f$ -критерій Фішера замість традиційних вирішальних правил, заснованих на критерії максимальної правдоподібності. Близьконульовою швидкістю є швидкість, яка не перевищує трьох середньоквадратичних похибок визначення координат за кадр. Достовірність показників якості виявлення близьконульового видимого руху досліджуваного об'єкта була перевірена методами статистичного та натурального моделювання, зокрема підтверджена його ефективність використання на серії більше чотирьох кадрів.

Тестування методів виконувалося в астрономічних обсерваторіях України і за кордоном у межах науково-технічного проекту в 2018 р.

Розроблений автором математичний метод визначення орієнтації проєктованих на небесну сферу систем об'єктів на двовимірному зображенні у термінах сферичної геометрії (п. 2.3.3) використовується для пошуку позиційного кута групи/скупчення галактик і може побічно свідчити про ізотропію/анізотропію розподілу галактик у їхньому габблівському русі [14].

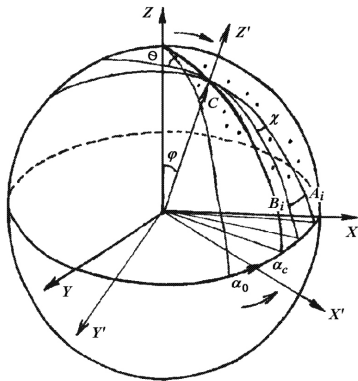


Рис. 2. Координатні системи, що використовуються для визначення орієнтації групи/скупчення галактик у проєкції на небесну сферу

Орієнтація визначається дугою  $A_i C$  великого кола, яка проходить через центр системи галактик, спроектованої на поверхню сфери, і задається позиційним кутом,  $\theta$ , який вимірюється від напрямку на північ проти годинникової стрілки до напрямку орієнтації системи галактик. Ця дуга визначається з умови, що сума кутових відстаней від кожної  $i$ -ї галактики до цієї дуги є мінімальною (рис. 2). Якщо для кожної  $i$ -ї галактики побудувати сферичний трикутник  $A_i B_i C$

та використати умову  $\sum \bar{A}_i \bar{B}_i = \min$ , то функція  $\Omega(\theta)$  кута  $\chi(i)$  між дугами  $B_i C$  і  $A_i C$ :  $\Omega(\theta) = \sum \sin^2 \chi_i = \sum \sin^2((\pi/2) - \delta'_i) \sin^2(\theta - \alpha'_i)$ , де  $\alpha'_i$  і  $\delta'_i$  – координати галактик у локальній системі координат. Мінімізуючи вираз по  $\theta$ , отримуємо вираз для величини позиційного кута:  $\theta_{cr} = \frac{1}{2} \arctg \left( \frac{\sum \cos^2 \delta'_i \sin 2\alpha'_i}{\sum \cos^2 \delta'_i \cos 2\alpha'_i} \right)$ . Орієнтація скуп-

чення галактик визначається як  $\theta = \pi - \theta_{cr}$ , якщо чисельник додатний, і  $\theta = -\theta_{cr}$ , якщо чисельник від'ємний.



Запропонований метод визначення орієнтації в термінах сферичної геометрії дозволяє уникнути ефекту «подвійної проекції» відстаней між галактиками на декартову площину. Метод було застосовано до вибірок галактик Місцевого надскупчення (розділ 4).

Загалом методи, які працюють із проективними зображеннями, ідентичні методам, що застосовуються як для аналізу розподілу небесних об'єктів на ПЗЗ-кадрах, про що йшла мова в п. 2.3.2, так і зображень рентгенівських скупчень галактик, про що йде мова в п. 2.3.4. Так, одним із самих уживаних методів обробки зображень X-скупчень галактик є метод розбиття зображення концентричними кільцями навколо його центра, що дозволяє розрахувати інтегральну кількість пікселів у кожному кільці і побудувати потім профілі радіального розподілу фізичних параметрів (температури, поверхневої яскравості тощо), використовуючи процедури депроєкції (рис. 3). Іншим інформативним підходом є метод контурів поверхневої яскравості [60], особливо для аналізу спектральних властивостей скупчення галактик і ототожнення розподілу яскравості з даними в інших спектральних діапазонах.

Автором було запропоновано ще один підхід до обробки зображення скупчення, в основі якого лежить хвильковий (wavelet) аналіз. У якості форми хвильки обрана функція  $F(r, a) = (2 - r^2/a^2) \exp(-r^2/a^2)$ , де  $r$  – відстань між центром зображення скупчення і пікселем з координатами  $(x, y)$ , де розраховується хвилькове перетворення [16]. Домінуючою умовою застосування є те, щоб зображення охоплювало весь розмір скупчення, – це ідеально підходить для аналізу саме в X-діапазоні (на відміну, зокрема, від оптичного). Завдання полягає у згортці двовимірного розподілу об'єктів (сигнальна функція  $S(r)$ ) на сітці  $N \times N$  пікселів у аналізуючу хвильку  $F(r, a)$ , де параметр  $a$  є масштабом покриття хвильки. Цей параметр визначає міру поширення розподілу об'єктів у просторі хвилькових коефіцієнтів,  $WC$ , і дозволяє виконувати подальший аналіз, оперуючи лише цими коефіцієнтами. Як видно із наведеної формули хвильки, вона має *a priori* радіальну форму, але спроможна виявляти і витягнуті субструктури [34].

Для порівняння методів були використані скупчення Ейбелла A2029, A2107, A2151 [16]. На рис. 3 подано результати застосування цих методів для скупчення A2029 ( $z = 0.0767$ ,  $\alpha = 15^{\text{h}}10^{\text{m}}56.20^{\text{s}}$ ,  $\delta = +5^{\circ} 44' 41''$ , у напрямі сузір'я Діва; у центрі скупчення знаходиться одна з найяскравіших із відомих галактик IC 1101 зі світністю  $L = 2 \cdot 10^{12} L_{\odot}$ ).

**У розділі 3 «Великомасштабна структура Всесвіту»** висвітлено сучасні уявлення про ВМС Всесвіту, сценарії формування галактик і скупчень галактик, моделі темної матерії (ТМ), кореляційні співвідношення та фрактальні концепції щодо розподілу ВМС Всесвіту, аналізуються неузгодженості «спостереження vs  $\Lambda$ CDM-модель».

У підрозділі 3.1 подано короткий огляд літературних джерел щодо відкриття ТМ у галактиках, у тому числі, у Галактиці, парах, групах і скупченнях галактик. Ці дослідження базувалися на кінематиці зір у дискових галактик, поведінці кривої обертяння та співвідношенні «маса–світність» для галактик

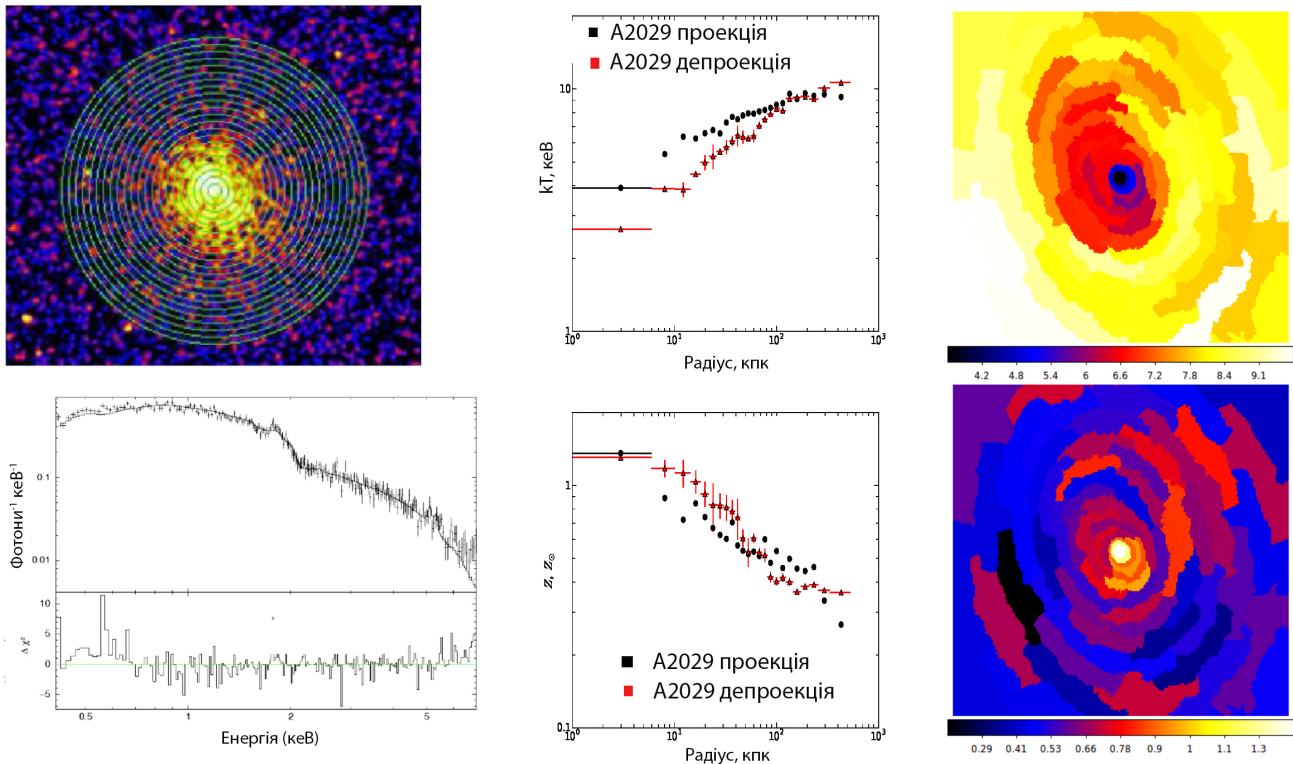


Рис. 3. Зображення, спектр та профілі розподілу температури і металічності скупчення галактик Ейбелла A2029 в X-діапазоні за даними обсерваторії Chandra [16]. Рисунок ліворуч: (верхній) зображення скупчення в діапазоні 0.5–7.0 keV з розбиттям на концентричні кільця; (нижній) спектр, змодельований тепловою моделлю. Рисунок у центрі: профілі розподілу температури (верхній) і металічності (нижній), отримані після обробки зображення методом концентричних кілець. Рисунок праворуч: карти розподілу температури (верхній) і металічності (нижній), які демонструють наявність субструктур у різних напрямках, пов'язаних із потоками охолодження міжгалактичного газу

(еліптичних, спіральних, карликових) і систем галактик. Виявилося, що в оптичному діапазоні повна маса галактики (скупчення галактик) збільшується з галактоцентричною відстанню на відміну від світності. Подальші дослідження розподілу баріонної і темної матерії, виконані в радіо, ІЧ-,  $\gamma$ - та X-діапазонах, підтвердили цей висновок та показали, що маса ТМ збільшується зі зростанням населеності системи, знаходячись переважно у гало галактик і скупчень галактик (див. розділи 4, 6 і 7).

У підрозділі 3.2 коротко розглядаються моделі темної матерії, які є основою відповідних космологічних моделей і еволюції ВМС Всесвіту: холодна і гаряча ТМ, тепла і змішана ТМ, самовзаємодіюча і саморуйнуюча та нечітка ТМ. Переваги моделі *холодної темної матерії*, CDM, тобто темної матерії, що містить частинки з нерелятивістськими швидкостями на ранній стадії еволюції Всесвіту, було вперше доведено в роботах Пібблса [58, 59], Блюменталю та ін. [48] та пізніше іншими авторами. Результати спостережень наднових зір типу Ia (High-Z Supernova Search Team; Supernova Cosmology Project) та розподілу флуктуацій температури реліктового випромінювання, СМВ (за даними WMAP) призвели до відкриття прискореного розширення Всесвіту, яке пов'язане з поняттям темної енергії (ТЕ). Прийнята сьогодні  $\Lambda$ CDM-модель передбачає повну

обґрунтованість загальної теорії відносності (ЗТВ) на всіх масштабах Всесвіту і вводить ненульову космологічну сталу  $\Lambda$  у рівняннях Ейнштейна, яка «містить у собі інформацію» про ТЕ і прискорене розширення Всесвіту (див. зокрема монографії українських авторів [42, 47, 57] і [36]).

За уточненими даними Planck Collaboration (2018) космологічна стала  $\Lambda = (4.24 \pm 0.11) \times 10^{-66} \text{ eV}^2 = (2.846 \pm 0.076) \times 10^{-122} m_{\text{Pl}}^2$  (де  $m_{\text{Pl}}$  – планківська маса,  $h = H_0/100 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$ ); стала Габбла, у  $\text{км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$ ,  $H_0 = 67.36 \pm 0.54$ ; густина матерії  $\Omega_m = 0.315 \pm 0.007$  і темної енергії  $\Omega_\Lambda = 0.6847 \pm 0.0073$ ; вік Всесвіту (млрд років) =  $13.801 \pm 0.024$ .

З одного боку, застосування  $\Lambda$ CDM-моделі успішно пояснює великий клас явищ, які обумовлюють формування й еволюцію ВМС Всесвіту, з другого боку, поки що не існує загальноприйнятого розуміння природи самої космологічної сталої. Зокрема, чому ця стала має таку малу величину у порівнянні з передбаченнями квантової теорії поля, чи може ця стала бути частиною інших теорій гравітації з динамічними моделями еволюції темної енергії, чи може ЗТВ бути застосована на всіх космологічних масштабах Всесвіту, які явища добре узгоджуються в рамках модифікованих теорій гравітації (див. [42, 57]).

У підрозділі 3.3 обговорюється зв'язок двох підходів для опису просторового розподілу ВМС Всесвіту – кореляційний та фрактальний аналізи, які дозволяють встановити співвідношення між глобальними параметрами (просторовий розподіл, «маса–світність») великомасштабних структур Всесвіту. За різними методиками розрахунку просторової та кутової кореляційних функцій з урахуванням систематичних похибок вимірювань відстаней до галактик було показано [58], що кореляційна довжина розподілу галактик  $r_{\text{gal\_gal}} = 5h^{-1} \text{ Мпк}$ , а скупчень галактик  $r_{\text{ск\_ск}} = 25h^{-1} \text{ Мпк}$ . Кореляційна функція розподілу галактик має дробову степеневу залежність  $\xi(r) \cong Ar^{-\gamma}$  ( $A = \text{const}$ ), де  $\gamma = 1.7 - 1.8$  (див., зокрема, [43]). Якщо  $\xi \ll 1$ , то розподіл слабо корельований, якщо  $\xi \gg 1$ , то розподіл галактик корельований і стає суттєво однорідним, тобто надскупчення або пустоти у розподілі галактик знаходяться значно далі, ніж кореляційна довжина. Співвідношення для фрактальної розмірності,  $D$ , і показника степеня кореляційної функції визначається як  $D = d - \gamma$ , де  $d$  — розмірність простору [55]. Використавши означення кореляційної функції, можна довести [44], що функція розподілу мас  $M(r) \approx r^{d-\gamma} \approx r^{-D}$ .

Діапазон значень розмірів і мас галактик становить принаймні 4 і 10 порядків відповідно. Оскільки через об'єктивні причини неможливо обрахувати розподіл всіх спостережуваних галактик (у першу чергу, через відсутність повної репрезентативності такої вибірки на великих червоних зміщеннях), то для застосування геометричних методів аналізу розподілу галактик зазвичай вибирають різноманітні каталоги/огляди галактик. Тут виникає проблема розміру  $R_{\text{виб}}$  такої вибірки, особливо коли цей параметр більший за певну довжину, яка відповідає однорідному розподілу. У випадку фрактальної системи, якою є ВМС Всесвіту принаймні до  $z < 5$ , кореляційна функція «приховує» фізичні властивості вибірки через граничні умови вибірки (каталогу) галактик. Для кореляційної довжини  $r_0$  у точці, де  $\xi(r) = 1$ , і для кореляційної довжини  $r_0'$  у

точці, де  $\xi(r) = 0$ , отримуємо  $r_0 = ((3-\gamma)/6)^{1/\gamma} R_{\text{виб}}$ ,  $r'_0 = ((3-\gamma)/3)^{1/\gamma} R_{\text{виб}}$ . Для  $r_0 > r'_0$  значення кореляційної довжини від'ємне, а для  $r \ll r_0$  або  $r \ll R_{\text{виб}}$  має степе-невий характер, а саме  $\xi(r) \sim Ar^{-\gamma}$ , де амплітуда  $A$  є функцією  $R_{\text{виб}}$ . Тобто,  $A(R_{\text{виб}}) = ((3-\gamma)/3)^{1/\gamma} \times R_{\text{виб}}^\gamma$ . Застосування монофрактальної моделі Колемана і П'єтронеро для розподілу галактик і розподілу скупчень галактик із вибірок, відповідно, розміром  $r_{\text{гал-гал}}$  та  $r_{\text{ск-ск}}$ , призводить до того, що амплітуди повинні співвідноситися як  $A(r_{\text{ск-ск}})/A(r_{\text{гал-гал}}) = (r_{\text{ск-ск}}/r_{\text{гал-гал}})^\gamma$ . Враховуючи показники степенів  $\gamma = 1.7-1.8$ , отримані за обробкою каталогів на  $r \leq 100h^{-1}$  Мпк, і те, що кореляційні довжини за розрахунками каталогів галактик і скупчень галактик співвідносяться як  $r_{\text{ск-ск}} \approx 5 r_{\text{гал-гал}}$ , отримуємо, що амплітуди кореляційних фун-кцій співвідносяться як  $A(r_{\text{ск-ск}})/A(r_{\text{гал-гал}}) \approx 15.4 \div 18$ . Це означає, що кореляції в розподілі скупчень галактик є *продовженням кореляції* розподілу галактик на більших масштабах, а різниця в амплітудах кореляційних функцій означає, що аналізуються розподіли на різних глибинах вибірки.

Глибина досліджуваної вибірки є невід'ємною складовою досліджень ве-ликомасштабного розподілу галактик. У роботі розрахунок здійснювався за формулою  $D_{\text{eff}} = [N(m_0)/n_0 ED_s^3]^{1/3}$ , де  $N(m_0)$  – очікувана щільність галактик у ви-бірці,  $n_0 ED_s^3$  – щільність, яка б очікувалася для граничної видимої зоряної величини  $m_0$  без поправок на кривизну простору і розширення Всесвіту,  $D_s = \text{dex}[0.2(m_0 - M^*) - 5]$  Мпк – характерна глибина огляду,  $M^*$  – характерна абсолютна зоряна величина для даної вибірки галактик.

У підрозділі 3.4 із урахуванням моделей ТМ, існуючих видів профілів розподілу густини матерії та спостережних даних про кореляції у розподілах галактик і скупчень галактик обговорюється сценарій ієрархічної кластеризації в процесі формування й еволюції галактик і скупчень галактик, факти узго-дження/неузгодження даних спостережних оглядів неба у різних спектральних діапазонах із теоретичними висновками  $\Lambda$ CDM-моделі.

Подано узагальнені висновки та оціночні судження автора, які сформу-вали постановку наукових досліджень ВМС Всесвіту, поданих у дисертації та в дисертаціях, захищених під керівництвом здобувача. Зокрема, попри значний успіх у поясненні ВМС Всесвіту,  $\Lambda$ CDM-модель стикається з потенційно сер-йозними проблемами на масштабах окремих темних гало галактик і скупчень галактик. У межах сценарію ієрархічної кластеризації уваги потребують не-узгодженості спостережень і теоретичних висновків на шкалі відстаней  $z < 2$ , а саме: щодо пояснення просторового розподілу галактик, де найкраще проявляє себе його комірковість (рис. 1); еволюційних співвідношень між основними параметрами галактик і груп (кінематичні і динамічні, морфологічний кон-тент); вмісту ТМ на масштабах груп і скупчень галактик; присутності окремих галактик, чії властивості не відповідають цій шкалі відстаней (зокрема ізольо-вані компактні еліптичні галактики), тощо [10, 27]. Зауважимо, що багато з цих проблем у кінцевому підсумку пов'язані і з тим, як саме взаємодіють темна і баріонна матерія на всій шкалі формування й еволюції ВМС Всесвіту, – ця проблема ще чекає свого пояснення.

У розділі 4 обговорюються «Розподіл і властивості ізольованих галактик і малонаселених систем галактик на  $z < 0.1$ , отриманих методом мозаїки Вороного вищих порядків».

Основний математичний апарат методу подано в підрозділі 4.1, показано його ефективність для отримання критеріїв ізольованості галактик та виявлення малонаселених груп галактик (рис. 4). Як правило, для ідентифікації груп галактик використовується принцип надмірної щільності галактик у порівнянні з фоном. Чим багатша населеність групи, тим сильніше щільність, і тому ймовірніше, що така група галактик фізично зв'язана. Ідентифікація малонаселених груп сильно залежить від граничних параметрів обраного методу [34]. Ці системи можуть бути легко переплутані з випадковими фізично незв'язаними системами. За цієї причини багато авторів вважають за краще вивчати лише багаті групи/скупчення галактик. Тому розробка надійних методів ідентифікації малонаселених груп дозволяє приділяти більше уваги фізичним властивостям таких систем, тим більше, що в окремих групах галактик, у т.ч. Місцевій групі [66], спостережувана оцінка вмісту ТМ не узгоджується зі сценарієм ієрархічної кластеризації в межах  $\Lambda$ CDM-моделі.

Вперше метод мозаїки Вороного першого порядку для ідентифікації малонаселених груп галактик був застосований у роботі [8] для розподілу галактик Місцевого надскупчення. При цьому виявилось, що використання мозаїки Вороного першого порядку є малоінформативним для пошуку малонаселених груп. Цей недолік зумовив розробку мозаїки Вороного вищих порядків для ідентифікації пар і триплетів галактик [6, 21, 32, 38, 39].

Коротко розглянемо метод. Кожна  $i$ -та галактика з множини  $S$  утворює спільні комірки з певною кількістю сусідніх галактик (рис. 4). Для мозаїки Вороного другого порядку кожна пара галактик  $(i, j)$  характеризується безрозмірними параметрами  $p_{i,j}$ :

$$p_{i,j} = \frac{\sqrt[D]{V_{i,j}}}{m_{i,j}}, \quad s = \frac{\sum_{j=1}^k p_j}{k}, \quad t_{i,j,u} = \frac{\sqrt[D]{V_{i,j,u}}}{\max(m_{i,j}, m_{u,j}, m_{i,u})}, \quad (1)$$

де  $D$  – розмір простору; параметр  $V_{i,j}$  – площа (для 2D-випадку) або об'єм (для 3D-випадку) комірки, який характеризує відстань до сусідніх галактик;  $m_{i,j}$  – відстань між галактиками  $i$  та  $j$ . Кожна галактика має набір параметрів  $p_{i,j}$ . Наприклад, галактика 1 має набір  $p_{1,2}, p_{1,3}, p_{1,4}$  і т.д. Максимальне значення з набору параметрів для галактики 1:  $p_{\max}(1) = \max(p_{1,2}, p_{1,3}, p_{1,4}, \dots)$ . У загальному випадку для  $i$ -ї галактики:  $p_{\max}(i) = \max(p_{i,j})$ , де  $j$  визначає кількість  $k$  сусідів. Геометричну пару другого порядку визначаємо як таку пару, що містить дві галактики зі спільною коміркою, які мають однакові параметри  $p_{\max}$ :  $p_{\max}(1) = p_{\max}(2) = p$ . Параметр  $p$  характеризує ступінь ізольованості пари галактик щодо загального розподілу (фону). Наприклад, дуже ізольована пара має велике значення  $p$  через велике  $V_{1,2}$  і мале значення  $m_{1,2}$  (рис. 4а).

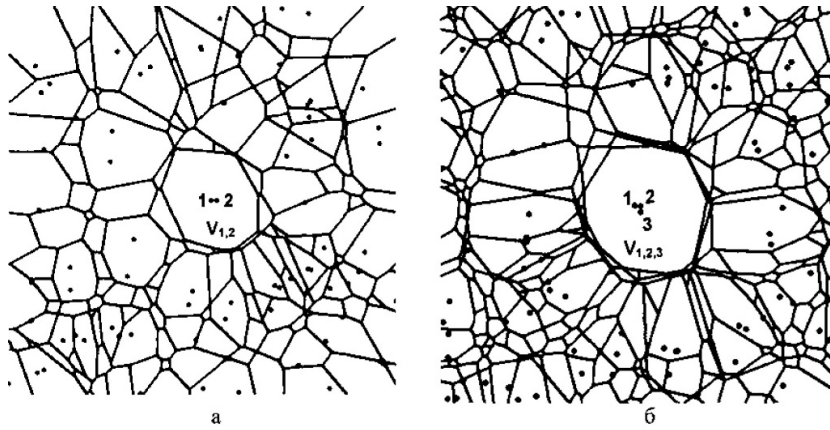


Рис. 4. Мозаїка Вороного (на площині) другого порядку (а) та третього порядку (б).

У центрі – ізольована пара (а), триплет (б) галактик

Введемо також параметр  $p_e$ , який не залежить безпосередньо від відстані між компонентами пари, і визначимо його як середнє значення параметрів  $p_j$  і  $p_l$  першої та другої галактик, за винятком  $p$  з обох множин:

$$p_e = \frac{\sum_{j=2}^k p_j(1) + \sum_{l=2}^n p_l(2)}{k+n-2}, \quad t_e = \frac{\sum_{i=2}^k t_i(1) + \sum_{j=2}^n t_j(1) + \sum_{u=2}^q t_u(3)}{k+n+q-3}, \quad (2)$$

де  $k$  і  $n$  – кількість сусідніх галактик для 1-ї і 2-ї галактик пари відповідно. Невелике значення  $p_e$  вказує на те, що така пара розташована в щільному середовищі, і середній об'єм комірок компонентів пар із сусідніми галактиками відносно невеликий, а відстань між ними велика (формула (2) і рис. 4а). У побудові мозаїки Вороного розподілу галактик будуть зустрічатися одиночні галактики, які не є членом жодної пари (рис. 4а).

Параметром, що описує ступінь ізольованості однієї галактики, є середнє значення  $s$  всіх параметрів  $p_j$  цієї галактики (1), де  $k$  – кількість сусідів. Отже, чим менше значення  $s$ , тим більше ізольованою є одиночна галактика.

Метод мозаїки Вороного третього порядку може бути розвинутий так само, як і для другого порядку (рис. 4б), тобто всі точки комірки Вороного загального триплету ближче до галактик цього триплету, ніж інші галактики. Подібно до параметра  $p_{i,j}$  для пар, вводиться параметр ступеня ізольованості  $t_{i,j,u}$  для триплетів (1) і параметр  $t_e$  (2). Із рис. 4б видно, що для триплету з найвищим ступенем ізольованості у розподілі галактик параметр ізольованості  $t$  має найбільше значення. Подібно до 3D-мозаїк Вороного другого і третього порядку, для ідентифікації квартетів галактик, квінтетів тощо можна застосувати більш високі порядки мозаїки Вороного [27].

При застосуванні методу до розподілу галактик певної вибірки (Місцеве надскупчення [9], огляд SDSS [4, 6, 21]), про що йде мова у підрозділі 4.2, галактики слугують ядрами мозаїки Вороного, де враховуються їхні екваторіальні координати  $\alpha$ ,  $\delta$  і радіальні швидкості  $V_h$ . Для побудови 3D-мозаїк Вороного необхідно визначити відстані в 3D-просторі. Просторова відстань між двома галактиками може бути розкладена на проекційну (тангенціальну) відстань  $r$  та радіальну складову  $v$ . При цьому, вимірювання радіальної швидкості кожної галактики за наявності сильних пекулярних швидкостей (за рахунок віріальних рухів галактик у групах і скупченнях) і граничних умов вибірки галактик приз-

водить до того, що розподіл галактик у просторі радіальних швидкостей витягується уздовж радіальної складової, так званий ефект «пальці Бога». Для усунення цієї проблеми було запропоновано введення ваги для радіальної складової швидкості (див. детальніше [6, 21] та розділ 4).

Для дослідження властивостей ізольованих галактик і малонаселених груп галактик було використано 11 000 галактик з радіальними швидкостями від 2500 до 10 000 км/с з огляду SDSS DR5 ( $H_0 = 75$  км/(с·Мпк)). Обмеження  $V_h > 2500$  км/с дозволяє оминати вплив скупчення Діва і не враховувати найближчі об'єкти з великим кутовим діаметром; не розглядалися галактики, які знаходяться в межах  $2^\circ$  поблизу границь вибірки, де неможлива правильна оцінка об'єма комірки Вороного. Після всіх урахувань вибірка містила 6786 галактик із  $3000 \leq V_{LG} \leq 9500$  км/с і є повною до  $17.7^m$  (де величини  $V_h$  були скориговані за швидкість,  $V_{LG}$ , центроїда Місцевої групи). Після застосування 3D-методу мозаїки Вороного другого порядку отримано 2 196 геометричних пар і 2 394 одиночні галактики, які були поділені на чотири рівні за параметрами ізольованості  $p$  і  $s$  відповідно згідно з (1). Чверті кожної підвибірки з найвищим ступенем ізольованості вважалися ізольованими (549 пар і 598 одиночних). Це означає, що ізольовані пари і одиночні мають  $p > Q_3$  і  $s < Q_1$  відповідно;  $Q_3$  – третій кuartиль, а  $Q_1$  – перший кuartиль. Застосування 3D-методу мозаїки Вороного третього порядку призводить до отримання 1 182 геометричних триплетів, чверть (297) триплетів із найвищим ступенем ізольованості  $t > Q_3$  (1) вважалася ізольованою (таблиця 1). Деталі порівняння і кореляції ізольованих галактик, пар і триплетів галактик, отриманих методом мозаїки Вороного, з іншими списками і каталогами (зокрема [20, 45]) подано в роботах [21, 27].

Окрім параметрів ізольованості та оточення  $p$ ,  $p_e$ ,  $s$ ,  $t$  та  $t_e$ , було розраховано кінематичні і динамічні характеристики [20]: середньоквадратична швидкість галактик  $S_V = \left[ \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (V_{LG}^k - \langle V_{LG} \rangle)^2 \right]^{1/2}$  по відношенню до центра групи (км/с),  $N$  – кількість галактик у групі,  $S_V = \Delta V / 2$  для пар; середній гармонічний радіус системи (кпк)  $R_h = \left( \frac{1}{3} \sum_{i,k} R_{i,k}^{-1} \right)^{-1}$ , де  $R_{i,k} = X_{i,k} \langle V_{LG} \rangle H_0^{-1}$  і  $X_{i,k}$  – це відносна кутова відстань;  $R$  – максимальна відстань між галактиками в триплетах, для пари галактик  $R_h = R$ ; безрозмірний габблівський час перетину системи  $\tau = 2H_0 R_h / S_V$ , виражений у одиницях космологічного часу  $H_0^{-1}$ ; віріальна маса,  $M_{vir}$ , в одиницях  $M_\odot$ ; світність галактики  $L_r$ , що відповідає величині Петросяна в  $r$ -смузі, в одиницях,  $L_\odot$ , та відношення маси до світності ( $G$  – гравітаційна стала):

$$M_{vir} = 3 \pi N(N-1)^{-1} G^{-1} S_V^2 R_h, \quad M/L = M_{vir} / \Sigma L_r. \quad (3)$$

Результати дослідження залежності величини середньоквадратичної швидкості і середнього гармонічного радіуса пар і триплетів від ступеня їх ізольованості подано в таблиці 1.

Для вивчення розподілу темної матерії в малонаселених групах галактик використовувалося співвідношення «маса–світність» (3) як кількісний показник вмісту ТМ. Звернемо увагу, що параметри ізольованості  $p$ ,  $t$  і віріальної маси  $M_{\text{vir}}$  залежать від розрахункової відстані,  $R$ , між галактиками. Таблиця 2 містить дані про медіани і квартилі величин часу перетину системи  $\tau$  і співвідношення  $M_{\text{vir}}/L$  для вибірок пар і триплетів галактик, що характеризуються різним ступенем ізольованості і компактності (підрозділ 4.3).

Таблиця 1  
Кінематичні параметри пар і триплетів галактик із різним параметром ізольованості

	$N$	$S_v$	$R_h$
Пари			
Всі геометричні	2196	$22^{+18}_{-11}$	$354^{+336}_{-199}$
$p > Q_1$	1677	$20^{+15}_{-11}$	$252^{+217}_{-130}$
$p > Q_2$	1038	$18^{+12}_{-10}$	$182^{+156}_{-91}$
$p > Q_3$	549	$16^{+8}_{-8}$	$106^{+73}_{-47}$
Триплети			
Всі геометричні	1182	$41^{+20}_{-15}$	$390^{+333}_{-184}$
$t > Q_1$	893	$38^{+16}_{-14}$	$330^{+216}_{-148}$
$t > Q_2$	582	$35^{+14}_{-12}$	$275^{+194}_{-109}$
$t > Q_3$	297	$31^{+11}_{-10}$	$212^{+132}_{-83}$

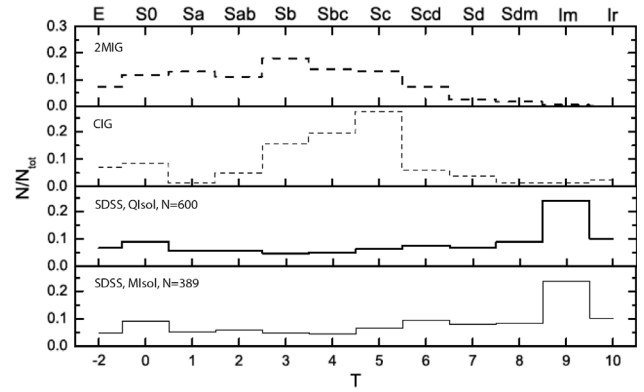


Рис. 5. Порівняння вмісту морфологічних типів ( $N/N_{\text{tot}}$  vs  $T$ ) вибірок ізольованих галактик: а) 2MIG, б) CIG, в) QIsol,  $N = 600$ , г) MIsol,  $N = 389$  [21, 27]

Таблиця 2  
Медіани і квартилі величин часу перетину і відношення маси до світності для пар і триплетів вибірки галактик SDSS DR5

Пари	$N$	$\tau$	$M_{\text{vir}}/L$	Триплети*	$N$	$\tau$	$M_{\text{vir}}/L$
$p > Q_3$	519	$1.12^{+1.24}_{-0.59}$	$12^{+37}_{-10}$	$t > Q_3$	297	$1.06^{+0.88}_{-0.42}$	$44^{+60}_{-28}$
$R < 50$	133	$0.18^{+0.20}_{-0.07}$	$7^{+28}_{-6}$	$R < 100$	16	$0.24^{+0.07}_{-0.08}$	$8^{+16}_{-3}$
$R < 100$	335	$0.40^{+0.47}_{-0.21}$	$9^{+31}_{-8}$	$R < 200$	70	$0.43^{+0.49}_{-0.24}$	$20^{+46}_{-13}$
$R < 150$	549	$0.61^{+0.63}_{-0.32}$	$14^{+44}_{-11}$	$R < 300$	136	$0.70^{+0.33}_{-0.28}$	$24^{+41}_{-16}$
$R < 200$	684	$0.70^{+0.75}_{-0.34}$	$17^{+50}_{-14}$	$R < 400$	240	$0.71^{+0.39}_{-0.30}$	$31^{+49}_{-18}$

\*Максимальна відстань  $R$  корелює з гармонійним радіусом  $R = 1.41R_h = 266$ , коефіцієнт кореляції 0.87 для триплетів; для пар  $R = R_h$ .

Для ізольованих галактик (вибірка QIsol на рис. 5) досліджувався їхній морфологічний контент (ранні і пізні типи) за дещо зміненою шкалою ( $T$ ) де Вокулера:  $-2 - E$ ,  $0 - S0$ ,  $1 - Sa$ ,  $2 - Sab$ ,  $3 - Sb$ ,  $4 - Sbc$ ,  $5 - Sc$ ,  $6 - Scd$ ,  $7 - Sd$ ,  $8 - Sdm$ ,  $9 - Im/BCG$ ,  $10 - Irr$ . У якості значимих сусідів розглядалися всі об'єкти, що мали різницю променевої швидкості 600 км/с або проекційну відстань 0.6 Мпк від ізольованих галактик, та було сформовано вибірку галактик без компаньйонів (MIsol). Як видно з рис. 5, морфологічні типи галактик вибі-



рок QIsol і MIsol у порівнянні з вибірками ізольованих галактик каталогу 2MIG [53] мають подібний вміст галактик ранніх типів: 19 % у 2MIG, 16 % у QIsol, 14 % у MIsol; максимум морфологічного розподілу для MIsol і QIsol вибірок знаходиться в типі  $Im$  ( $T = 9$ , рис. 5), який здебільшого містить блакитні компактні галактики (BCGs) із сильними емісійними лініями. Загалом у досліджуваних групах, де переважають галактики ранніх типів, темна матерія переважно концентрується в гало галактик, що входять у групи, а у групах, де переважають галактики пізніх типів, – у спільному гало групи галактик [10].

Вміст темної матерії, отриманий за медіанною оцінкою співвідношення «маса–світність» для розподілу галактик з огляду SDSS на  $z < 0.03$ , становить  $12 M_{\odot}/L_{\odot}$  для ізольованих пар,  $44 M_{\odot}/L_{\odot}$  для ізольованих триплетів;  $7(8) M_{\odot}/L_{\odot}$  для компактних пар (триплетів) галактик із характерною відстанню між галактиками менше 50 (100) кпк відповідно, і від 20 до 50  $M_{\odot}/L_{\odot}$  для малонаселених груп у залежності від складу групи. Доведено, що чим менш ізольованою є система галактик, тим більшим для неї є відношення «маса–світність», що також свідчить про те, що у більш щільному оточенні групи галактик мають вищу дисперсію швидкостей.

**Розділ 5** містить результати застосування «**Методів машинного навчання для встановлення морфології галактик на  $z < 0.1$  та розподілу галактик за Зоною уникання Галактики**».

Описано основні етапи морфологічної класифікації галактик на  $z < 0.1$  із оглядів SDSS DR5 і SDSS DR9, яка була отримана на основі розроблених критеріїв класифікації за фотометричними параметрами галактик (п. 5.1). Для цього було використано вибірку  $N = 549$  пар галактик, отриману методом мозаїки Вороного [21], для яких відстань між компонентами пари менше 150 кпк (таблиця 2). Після візуального перегляду для подальшого дослідження було залишено 365 пар, з яких 32 є взаємодіючими (інші 184 пари входять у більш населені системи). Медіанне значення  $S_v$  між компонентами пар  $S_v = 32$  км/с, середня відстань між компонентами пари  $R = 105$  кпк. Нагадаємо, SDSS надає фотометрію у п'яти смугах  $u, g, r, i, z$ , що відповідають чотирьом показникам кольору. Виявилось, що медіанне значення показника кольору залишається практично постійним для типів  $T = -2 \div 0$  і  $T = 7 \div 10$ . Це дозволило розділити морфологічні типи на три групи: еліптичні та лінзовидні  $E+S0$  ( $T = -2 \div 0$ ), спіральні  $Sa-Scd$  ( $T = 1 \div 6$ ) і пізні спіральні та іррегулярні  $Sd-Sdm-Im/BCG$  ( $T = 7 \div 10$ ) галактики.

Результати дослідження показали, що за допомогою одного з трьох показників кольору ( $u-r$ ), ( $g-i$ ), ( $r-z$ ) і таких параметрів, як зворотний індекс концентрації ( $R50/R90$ ), абсолютна зоряна величина ( $M_r$ ), радіус де Вокулера ( $deVRad_*$ ) і масштабний радіус ( $expRad_*$ ), можна провести надійну попередню морфологічну класифікацію, не вдаючись до візуального перегляду [5, 7]. При цьому понад 98 % галактик ранніх типів ( $T = -2 \div 0$ ), 57 % спіральних ( $T = 1 \div 6$ ) і 88 % пізніх спіральних і іррегулярних ( $T = 7 \div 10$ ) галактик виявляються в «своїх» областях відповідності морфологічним типам. Виявлені критерії автоматичної

морфологічної класифікації були застосовані для визначення морфологічних типів 316 027 галактик огляду SDSS DR9 на  $z < 0.1$ .

Стрімке зростання обсягів спостережень і наповнення астроінформаційного ресурсу досліджень галактик поставило завдання розробки автоматичної морфологічної класифікації галактик методами машинного навчання (підрозділ 5.2). Одним із перших став алгоритм «Штучної нейронної мережі», точність класифікації (або рівень успішності) якого становив від 65 % до 90 % залежно від математичних тонкощів застосовуваних методів та якості вибірок галактик [63]. Особливо плідними ці розробки стали для огляду SDSS, для галактик якого морфологічний тип невизначений, – точність автоматичної морфологічної класифікації галактик упродовж останніх років завдяки застосуванню різних методів машинного навчання досягла  $\sim 90$  % [49]. При цьому, виконання суспільного проекту Galaxy Zoo із візуальної морфологічної класифікації галактик на три класи (ранні типи, спіральні галактики, важко визначити/спам) дозволило сформувати гарні тренувальні вибірки GZ1 і GZ2 [50]. Зокрема, каталог морфологічних типів GZ2 містить понад 16 мільйонів морфологічних класифікацій 304 122 галактик та їх більш детальних морфологічних ознак (перемички, балджи та форми дисків, спіральні рукави).

У роботі використовувалася вибірка  $N = 60\,561$  галактики огляду SDSS DR9 із видимою  $m_r < 17.7$  і абсолютною  $-24^m < M_r < -17^m$  зоряними величинами на  $0.02 \leq z \leq 0.06$ , виділених тривимірним методом мозаїки Вороного ([4], розділ 4). Мозаїка Вороного чутлива до крайових ефектів, тому всі клаптикувати краї вибірки було обрізано. Вибірку було обмежено за зоряною величиною в  $r$ -фільтрі  $modelMag_r < 17.7^m$  для усунення типових похибок спектроскопії за рекомендацією SDSS. Абсолютну зоряну величину галактик було розраховано за формулою:  $M_r = m_r - 5 \cdot \lg(D_L) - 25 - ext_r - k_r$ , де  $m_r$  – видима зоряна величина в  $r$ -фільтрі,  $D_L$  – фотометрична відстань до джерела,  $ext_r$  – поправка за поглинання світла в нашій Галактиці в  $r$ -фільтрі,  $k_r$  – K-поправка за червоне зміщення в  $r$ -фільтрі ( $H_0 = 75$  км/(с·Мпк)).

Оскільки автоматична морфологічна класифікація на три класи, проведена у попередньому дослідженні з галактиками SDSS DR5 (підрозділ 5.1), показала низьку успішність класифікації для спіральних галактик типу  $Sa$ – $Scd$ , вирішено було зосередитися на бінарній класифікації ранніх ( $E$ ,  $S0$ ,  $S0a$ ) і пізніх (від  $Sa$  до  $Irr$ ) типів галактик. Критеріями класифікації було обрано фотометричні параметри, які найбільше корелюють з морфологією галактик: показники кольору ( $M_u - M_r$ ,  $M_g - M_i$ ,  $M_r - M_z$ ), зворотний індекс концентрації яскравості до центра  $R50/R90$ , абсолютна зоряна величина ( $M_u$ ,  $M_g$ ,  $M_r$ ,  $M_i$ ,  $M_z$ ). Для тренувальної вибірки 764 галактик, випадково вибраних із різних діапазонів червоних зміщень і світностей огляду SDSS DR9, візуально було визначено морфологічні типи (460 раннього ( $E$ ) типу і 304 пізнього ( $L$ ) типу).

Бінарна морфологічна класифікація за допомогою методів машинного навчання Naive Bayes, Random Forest,  $k$ -nearest neighbors, Logistic regression, Support Vector Classifier із застосуванням програмного забезпечення WEKA 3.7 та нейронних мереж (RProp MLP), програмного забезпечення з відкритим ко-

дом KNIME Analytics Platform 3.5.0, яке призначене для передбачення (класифікації) даних різними методами машинного навчання, описана в [31]. Точність методів оцінювалася за допомогою методу перехресних перевірок (*k-fold cross-validation*), де точність класифікації визначалася як середнє за тестовими вибірками (див. приклади на рис. 6):

Naive Bayes classifier:  $0.89 \pm 0.01$  ( $E - 0.92, L - 0.82$ );

k-nearest neighbors classifier:  $0.945 \pm 0.006$  ( $E - 0.9389, L - 0.958$ );

Logistic regression classifier:  $0.949 \pm 0.006$  ( $E - 0.968, L - 0.911$ );

Random Forest classifier:  $0.955 \pm 0.003$  ( $E - 0.967, L - 0.928$ );

Support Vector Machine classifier:  $0.964 \pm 0.006$  ( $E - 0.961, L - 0.969$ ).

Це дозволило вперше для автоматичної морфологічної класифікації галактик досягнути найкращий результат успішності на рівні 96 % із застосуванням класифікаторів «Випадковий ліс» (Random Forest) і «Метод опорних векторів» (Support Vector Machine).

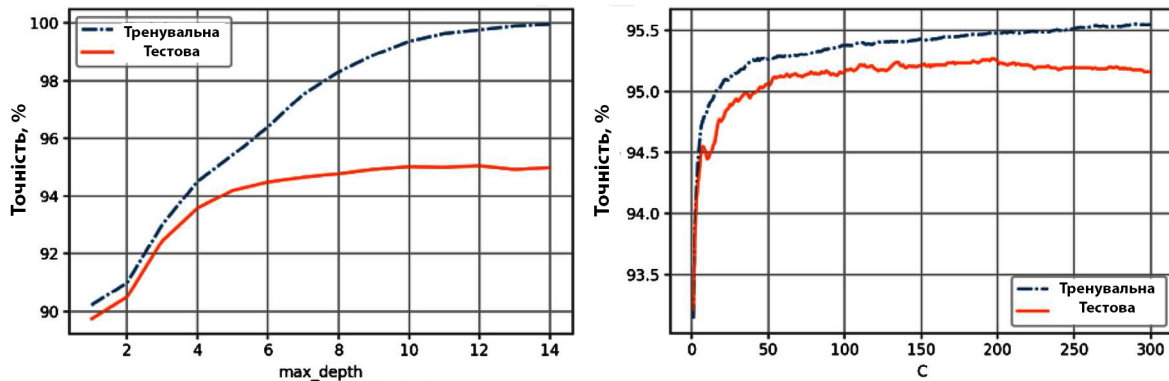


Рис. 6. Залежність точності передбачення методу Random Forest від параметра «max\_depth» (ліворуч) і методу Support Vector Machine від параметра «C» (праворуч) для автоматичної морфологічної класифікації галактик SDSS на  $0.02 \leq z \leq 0.06$

У цьому розділі також проаналізовано проблемні точки методів машинного навчання та шляхи їх можливого подолання для автоматичної морфологічної класифікації галактик SDSS: класифікація галактик, видимих плазом і з ребра, галактики «зеленої долини» на діаграмі «колір–зоряна величина», гравітаційні лінзи, які класифікуються як еліптичні галактики, тощо. Приклади правильного та неправильного визначення раннього і пізнього морфологічних типів галактик методами машинного навчання для галактик огляду SDSS подано на рис. 7.

Підрозділ 5.3 присвячений методам відновлення просторового розподілу галактик за Зоною уникання Галактики.

Коротко подано історію проблеми та охарактеризовано важливість її для встановлення параметрів ВМС Всесвіту, особливо на шкалі відстаней до  $z < 2$ . Протягом тривалого часу цю зону ( $|b| \pm 20^\circ$ ) уникали астрономи через малу кількість відомих галактик, зменшення яскравості позагалактичних об'єктів до галактичного екватора, викликаного поглинанням Галактики, збільшення кон-

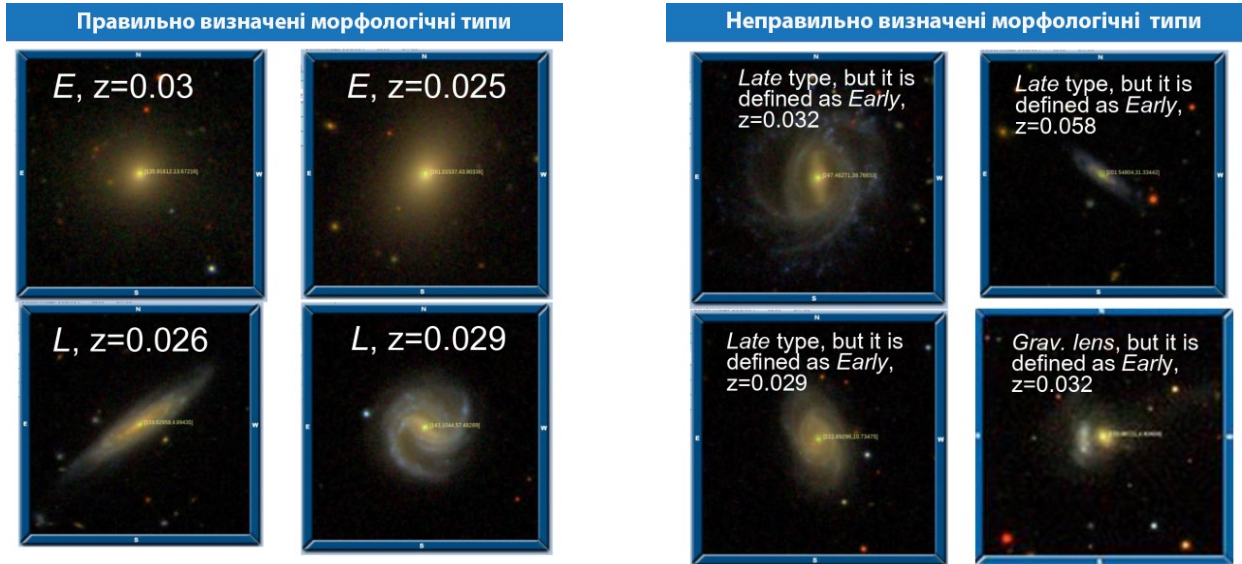


Рис. 7. Приклади визначення морфологічного типу галактик SDSS методами машинного навчання для галактик раннього і пізнього типів (правильного, ліворуч); для галактик, видимих пласко і з ребра; із різкими градієнтами яскравості; гравітаційна лінза (помилкового, праворуч)

центрації зір на лінії зору, що призводить до збільшення перекривання позагалактичного об'єкта з зорею та ін. (рис. 1).

За останні роки завдяки спостереженням в ІЧ- і радіо (в лінії HI) діапазонах, в яких, внаслідок зменшення кількості поглинання світла зі збільшенням довжини хвилі, Зона уникання стає більш прозорою, розподіл галактик за Зоною уникання частково встановлений. Виявлені джерела  $\gamma$ - і X-випромінювання (для яких вона прозора) потребують ідентифікації в оптичному діапазоні.

На сьогодні Зона уникання закриває область на небі приблизно  $|b| \pm 10^\circ$  у залежності від довжини хвилі [54], а отже, характеризується невизначеністю за повнотою і глибиною, як і найбільша невизначеність стосується оптичного діапазону. Через неповноту вибірки галактик в області поглинання, на основі якої будується поле швидкостей, не можна визначити однорідність розподілу, що дає помилку в певному напрямку руху Галактики. Проблема розбіжності між векторами руху галактик Місцевої групи відносно системи координат, пов'язаної з реліктовим випромінюванням, свідчить про наявність значної кількості галактик за Зоною уникання. Виконані COBE вимірювання СМВ показали асиметрію  $180^\circ$ , відому як диполь, яка проявляється у «нагріванні» СМВ на 0.1 % у порівнянні з середнім значенням в одному напрямку і «охолодженні» в протилежному. Наша Галактика і Місцева група галактик рухаються з  $V_p = 627$  км/с,  $l = 276^\circ$ ,  $b = 30^\circ$  у напрямку сузір'я Гідри внаслідок розподілу матерії  $M_i$  між членами Місцевої групи з  $\vec{V}_p \propto \frac{\Omega_0^{0.6}}{b} \sum_i \frac{M_i \hat{r}_i}{r_i^2}$  ( $\Omega_0$  – космологічний параметр). При цьому невідомі галактики, що є ближче до нас у Зоні уникання, мають більший внесок у визначення вектора колективної швидкості, ніж невідомі скупчення галактик на великих відстанях:  $\vec{V}_p \propto \sum_i 10^{-0.4m} \hat{r}_i$ . Щоб подолати

цю невідповідність між напрямком на диполь СМВ та очікуваним вектором швидкості, було введено штучне поняття «Великого атрактора» (рис. 1) на відстані  $\sim 60$  Мпк.

Одним із шляхів вирішення проблеми Зони уникання, окрім прямих спостережних методів, є застосування математичних методів для відтворення розподілу ВМС за Зоною уникання [35]. Запропоновані два алгоритми вирішення проблеми методами машинного навчання [17] описано в розділі 5.4, окремі елементи схеми алгоритмів подано на рис. 8. У їхній основі закладено концепцію корельованості і фрактальності (самоподібності) розподілу галактик і скупчень галактик, про що йшла мова в розділі 3.

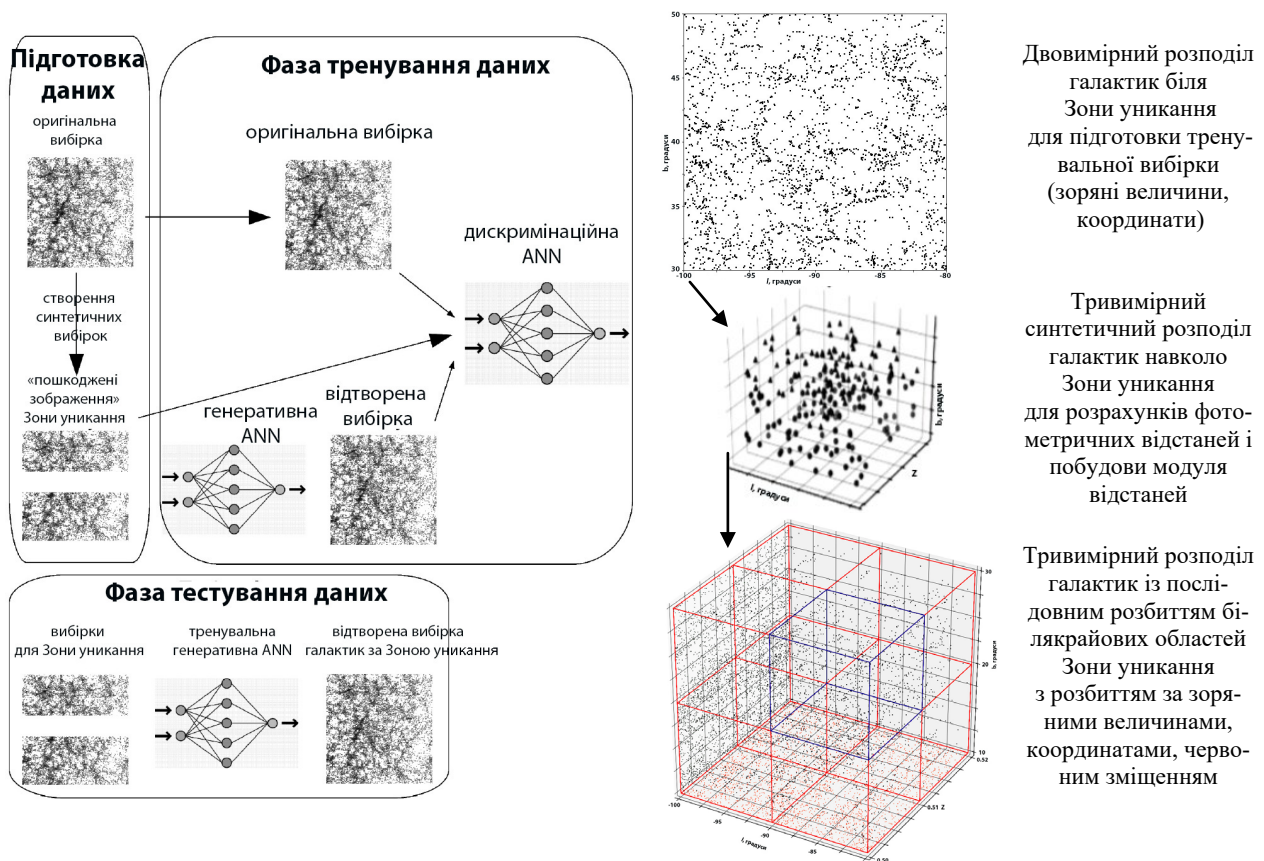


Рис. 8. (Ліворуч) Блок-схема підготовки даних, фаз тренування та тестування для відтворення Зони уникання методом генеративних штучних нейронних мереж. (Праворуч) Окремі елементи блок-схеми алгоритму відтворення пошкоджених зображень для Зони уникання (галактичні координати) [16]

Основою генеративної нейронної мережі (GAN, [52]) є дві нейронні мережі, котрі змагаються між собою: генеративна (деконволюційна) генерує дані, а друга дискримінаційна (конволюційна) оцінює їх. У роботі [61] метод застосовувався до галактик SDSS DR12 для відновлення властивостей у пошкоджених зображеннях галактик. Ці дві нейромережі навчаються одночасно, тому тренуючись із зображеннями з вищою якістю, метод самонавчається відновлювати інформацію з менш якісних даних, створюючи пріоритети.

При застосуванні методу до відтворення розподілу галактик за Зоною уникання як до «пошкодженого» розподілу необхідно підготувати «синтетичні»

каталоги, які шляхом чисельного моделювання відтворюють вибірку. Це пов'язано з тим, що для навчання методу існує лише унікальний, один, набір галактик. Для згладжування розподілів у крайових зонах запропоновано алгоритм латання пошкоджених зображень [17], який працює з навчальними вибірками, що оточують Зону уникання, послідовними зрізами за червоним зміщенням (фотометричною відстанню з урахуванням космологічних параметрів), зоряними величинами, координатами та враховує модулі відстаней галактик.

У розділі 6 розглянуто «Мультихвильові властивості 2MIG ізольованих галактик з активними ядрами на  $z < 0.1$ ». Під ізольованими галактиками розуміємо, як правило, галактики, розташовані в дуже низькій щільності оточення і вибрані за визначеними критеріями (різниця швидкостей, кутові діаметри, кількість сусідів у певному околі), які можуть залежати від однорідності і повноти каталогу. Оскільки такі галактики декілька мільярдів років своєї еволюції не зазнавали впливу оточення, дослідження їхніх властивостей у широкому діапазоні спектру надає можливість виділити ті, які зумовлені тільки внутрішніми механізмами. Зокрема, одним із висновків роботи [21] щодо відношення «маса–світність» було те, що ізольовані галактики мають в два рази меншу світність, ніж галактики в ізольованих парах і триплетах. Особливістю проведеного дослідження [11, 19, 26, 30, 33, 37, 40] є сконцентрованість на ізольованих галактиках із активними ядрами (АЯГ), вибірка яких,  $N = 61$ , була сформована шляхом крос-кореляції каталогу 2MIG [53] та каталогу АЯГ і квазарів [65] на  $z < 0.1$  (2 % галактик 2MIG; для порівняння, 1 % від загальної кількості галактик мають АЯГ). Критерії ізольованості галактики в 2MIG: галактики з видимими величинами  $K_s$  в ІЧ-діапазоні  $4.0^m < K_s \leq 12.0^m$  та кутовими діаметрами  $a_K \geq 30''$  вважалися ізольованими, якщо всі відповідні сусідні галактики з кутовими діаметрами  $a_i$  та відстанями  $x_i$  задовольняли емпіричним умовам  $x_{1i}/a_i \geq 30$ ;  $1/4 \leq a_i/a_1 \leq 4$ .

Для розгляду мультихвильових властивостей і визначення мас надмасивних чорних дір (НМЧД) ізольованих АЯГ (підрозділ 6.1) було використано огляд SDSS, який містить спектри галактик: до цієї вибірки увійшло 36 об'єктів ( $\delta > -15^\circ$ ). Після ретельного перегляду із використанням бази даних NED та розширення критеріїв, галактики вибірки було розбито на декілька груп: 15 ізольованих АЯГ, 5 ізольованих з ознаками активності в центрі (зокрема LINEAR), 6 ізольованих композитів (мають зони НІ у центрі й асоціюються з типом Sy2 АЯГ), 10 ізольованих АЯГ, для яких виявлено слабкі супутники ( $\Delta x_{1i} = 750$  кпк,  $\Delta V_r = \pm 500$  км/с). Перерахунки здійснювалися з урахуванням  $z$ , сталої Габбла  $H_0 = 73.0$  км/(с·Мпк) та того факту, що гало темної матерії галактики може бути розширено далі, ніж видима частина (кутовий діаметр) галактики огляду 2MASS-XSC, визначена за критерієм каталогу 2MIG.

Основні кінематичні, динамічні, морфологічні і спектральні властивості ізольованих АЯГ близького Всесвіту (підрозділ 6.2) за результатами дослідження [11, 19, 27]: більшість галактик належить до морфологічних типів S0–Sc (близько 30 % типу Sb), галактики типів Scd та Im мають слабкі супутники; спектральний тип більшості АЯГ належить до Sy2, а всі галактики типу Sy1n і

Sy1 без супутників мають перемички, отже області широких емісійних ліній (ОШЛ) можуть бути пов'язані з наявністю перемички в материнській галактиці, яка самозабезпечує перенесення газу і пилу з диска галактики в центральні області ядра; усі 2MIG Sy1n містять області НІІ згідно з діаграмою Болдвіна, Філіпса та Терлевича (див. таблицю 3).

Таблиця 3

Потоки в спектральних лініях (в одиницях  $10^{-17}$  ерг/см<sup>2</sup>·с) для окремих 2MIG ізольованих АЯГ за даними SDSS DR9 та визначений тип ОШЛ

Назва	H $\alpha$	H $\beta$	[OI]	[OIII]	[NII]	[SII]	Тип ОШЛ
IC 2227	1256	207	122	2590	990	473	АЯГ
CGCG 179-005	3265	505	153	2228	1015	553	АЯГ
UGC 06087	379	55.4	33.3	308	349	127	АЯГ
UGC 06398	929	210	68.2	1587	966	395	АЯГ
UGC 06769	271	39.4	35.3	737	270	0	АЯГ
Mrk 42	14339	4018	88.9	1100	1896	730	НІІ
NGC 5231	2286	469	297	1759	2832	1721	АЯГ
NGC 5347	3185	645	559	5390	2141	1583	АЯГ
CGCG 248-019	608	83.8	82.1	125	431	234	Композит
MCG +09-25-022	9892	1996	174	3581	1526	947	НІІ
UGC 10120	18050	6663	52.8	2194	4874	645	НІІ
UGC 10244	16.7	26.9	288	41.3	193	110	LINEAR
UGC 10774	243	22.4	13.7	37.2	187	120	АЯГ
IC 5287	669	132	79.6	790	561	180	АЯГ
Об'єкти, що виключені з вибірки як неізольовані галактики							
UGC 01597	4695 770	9368	24598	4606	1959 450	40 901	НІІ
NGC 4395	13746	3275	3091	32088	2681	4899	АЯГ

Мультихвильові властивості 2MIG ізольованих АЯГ подано в підрозділі 6.3, а обговорення і порівняння з роботами інших авторів – у підрозділі 6.4. Зазначимо, що переважна більшість ізольованих АЯГ із вимірюваними радіопотоками на  $\nu = 1.4$  ГГц є досить тихими ( $R < 10$ ); ці об'єкти є досить слабкими джерелами УФ- і Х-випромінювання, зокрема для 12 об'єктів із доступною вимірюваною УФ-зоряною величиною середнє значення  $U = (16 \pm 1.47)^m$ ; для ізольованих без і зі слабкими супутниками середній потік у діапазоні 2–10 кеВ становить  $9.4 \times 10^{-12}$  ерг/(с·см<sup>2</sup>) і  $99.2 \times 10^{-12}$  ерг/(с·см<sup>2</sup>) відповідно; маси НМЧД, отримані за спектрами із бази даних SDSS, знаходяться в інтервалі від  $1.2 \times 10^5$  до  $8 \times 10^5 M_{\odot}$ . Для 15 ізольованих АЯГ, для яких доступні дані обсерваторій Chandra, XMM-Newton, Swift і NuStar, визначено Х-властивості [26, 40] при більш точному врахуванні параметрів моделі та типу АЯГ (на рис. 9 подано залежності фотонного індексу від потоку для 11 ізольованих АЯГ). Вибірка 43 із 61 досліджених 2MIG ізольованих АЯГ представлена в базі даних NASA/IPAC Extragalactic Database (NED) [29].

У розділі 7 розглядається «Вміст темної матерії Х-скупчень галактик за даними космічної обсерваторії Chandra». Скупчення галактик є найбільшими віріалізованими структурами у Всесвіті загальною масою до  $10^{15} M_{\odot}$ , понад 80 % якої перебуває у вигляді ТМ. Інша частина маси містить баріони, більшість з яких є дифузною, гарячою плазмою (міжкластерне середовище,

ISM), яка випромінює переважно в X-діапазоні. Тим самим X-скупчення галактик надають можливість спостерігати і вивчати взаємодію між гарячим і холодним компонентами баріонної і темної матерії, – короткий огляд робіт за цією тематикою подано в підрозділі 7.1.

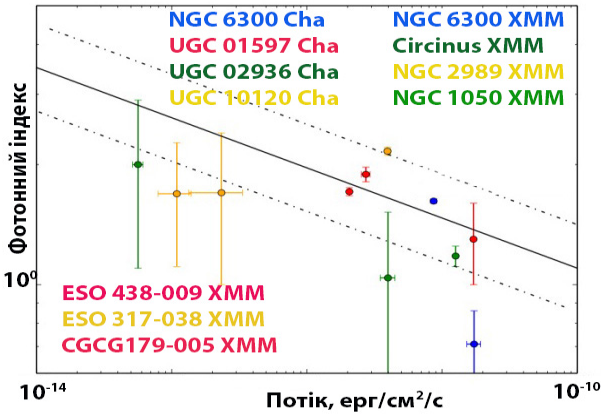


Рис. 9. Залежність «фотонний індекс – потік», для 2MIG ізольованих АЯГ. Суцільна лінія – степенева модель із нахилом 1.3, пунктирні – довірчий інтервал  $2\sigma$  [19, 26]

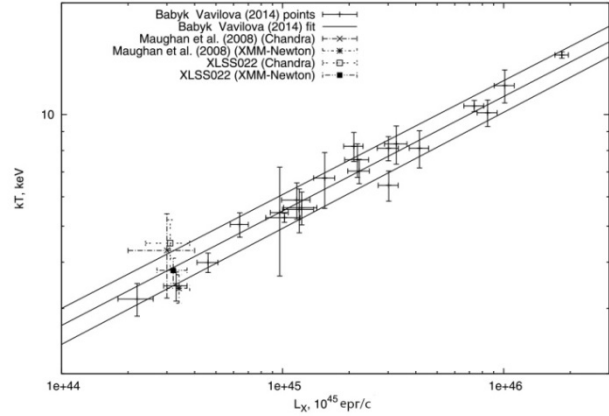


Рис. 10. Залежність «світність – температура» для 22 X-скупчень галактик на  $z < 0.4$ . Лінії відповідають  $L_X \sim (1+z)^{A_{L_X-T}} \times T^{\beta_{L_X-T}}$  з параметрами ( $1\sigma$ )  $\beta_{L_X-T} = 2.55 \pm 0.07$  і  $A_{L_X-T} = 1.50 \pm 0.23$  [3]

Важливу залишається фундаментальна роль баріонної матерії в структурній формі профілів густини матерії, оскільки різні процеси впливають на формування більш плоского внутрішнього профіля густини, серед яких – енергетичний взаємообмін від зоряного баріонного компонента до темної матерії, що стимулює її нагрів і зменшує центральну густину темної матерії. Запропонована модель ТМ у X-скупченнях галактик на  $z < 1.4$  та оцінки вмісту ТМ із урахуванням внеску найяскравішої галактики скупчення подана в підрозділі 7.2, а саме: розглянуто властивості 129 X-скупчень галактик, отримано оцінки температури, світності, маси газу міжкластерного середовища за даними обсерваторії Chandra [1]. Подано етапи формування вибірки, методику обробки даних, у т.ч. за розбиттям зображень на концентричні кільця різної товщини з однаковою кількістю X-фотонів (радіус кільця  $\sim 1$  Мпк) та методом депроекції (рис. 3). Для дослідження відбиралися достатньо прорелаксовані скупчення для узгодження з  $\Lambda$ CDM-моделлю ( $H_0 = 73.0$  км/(с·Мпк)); більшість із них мають  $0.01 \leq z \leq 0.3$ , тоді як загальний діапазон  $z < 1.4$ , – вибірка та отримані результати представлені в базі даних VizieR Online Data Catalogue [28].

Для кожного досліджуваного скупчення було виконано серію чисельного моделювання профіля міри емісії, де використано два вільних параметри  $\rho_0$  і  $r_s$  із моделі Наварро–Френка–Уайта (НФУ, [56]):  $M(< r) = 4\pi\rho_0 r_s^3 \left[ \ln\left(1 + \frac{r}{r_s}\right) - \frac{r}{r_s + r} \right]$ .

Перебираючи їх у допустимих межах,  $\rho_0$  від  $10^{-25}$  до  $10^{-18}$  і  $r_s$  від 0.1 до 2 Мпк, було відібрано таку пару значень, яка найкращим чином описує спостережуваний профіль густини матерії скупчення галактик. Використовуючи  $\chi^2$ -кри-



терій, було знайдено значення  $\rho_0$  і  $r_s$  із 90 % довірчим інтервалом, а потім, використовуючи ці параметри, реконструйовано профілі густини для ТМ і міжгалактичного газу. Профіль повної маси розраховувався як сума трьох компонентів, а саме: гало ТМ (узагальнений профіль НФУ), газового компонента і зоряного компонента центральної найяскравішої галактики (профіль Джаффе). Співвідношення між розміром гало ТМ,  $c_{200} \equiv c_{vir} \equiv (r_{vir}^{total} / r_s^{dark})^3$ , і масою  $M_{200} \equiv M_{vir}$  розраховувалося за формулою  $c_z = \frac{c_0}{(1+z)^b} \left( \frac{M}{8 \times 10^{14} h^{-1} M_{Sun}} \right)^\alpha$ , де  $b \neq 1$ , на відміну від роботи [51], дозволяє отримати еволюційну залежність.

У підрозділі 7.3 обговорюються отримані обмеження на еволюцію співвідношень між світністю  $L_X$ , температурою  $T$  і масою газу в 22 X-скупченнях на  $0.4 < z < 1.4$  у припущенні ізотермічного й сферичного розподілу міжгалактичного газу та гідростатичної рівноваги. На рис. 10 подано одну з таких залежностей, яка показує значиму еволюцію « $L_X$ – $T$ » для віддалених скупчень галактик у порівнянні з близькими скупченнями. Для такого широкого інтервалу червоних зміщень зазначені залежності отримані вперше [2, 3].

У **Висновках** сформульовано основні результати та наукові проблеми, для розв'язання яких вони можуть бути застосовані; обговорюється постановка перспективних завдань досліджень ВМС Всесвіту за тематикою роботи. **Додаток** містить список опублікованих праць за матеріалами роботи та відомості про апробацію результатів дисертаційного дослідження.

## ВИСНОВКИ

Для досліджень фізичних властивостей, еволюційних співвідношень і закономірностей розподілу ВМС Всесвіту автором розроблено нові або адаптовано існуючі математичні методи, які дозволяють виокремлювати системи галактик у загальному розподілі для подальшого визначення їхніх кінематичних/динамічних параметрів, вмісту баріонної і темної матерії, встановлення статистично значущих усереднених характеристик ізольованих галактик, малонаселених груп і скупчень галактик для з'ясування впливу оточення.

Вперше запропоновано та доведено ефективність застосування розробленого методу мозаїки Вороного вищих порядків для встановлення критеріїв ізольованості ВМС Всесвіту і виявлення просторового розподілу галактик на масштабах малонаселених груп.

Вперше досліджено вміст темної матерії малонаселених груп галактик огляду SDSS та Місцевого надскупчення, виділених методом мозаїки Вороного, за співвідношенням «маса–світність»: 12(44)  $M_\odot/L_\odot$  для ізольованих пар (триплетів), 7(8)  $M_\odot/L_\odot$  для компактних пар (триплетів) галактик огляду SDSS; 34  $M_\odot/L_\odot$  для груп від 4 до 10 галактик Місцевого надскупчення. Отримано їхні кінематичні/морфологічні параметри і показано, що чим компактніше система галактик, тим більше темна матерія асоціюється з загальним гало системи.

Вперше виконано комплексне дослідження мультихвильових властивостей 2MIG ізольованих галактик із активними ядрами (АЯГ) на масштабах близького Всесвіту. Показано, що для більшості з них енергетичні параметри у

всіх спектральних діапазонах значно менші за параметри галактик, що знаходяться у щільному оточенні, у т.ч. меншими є маси їхніх центральних надмасивних чорних дір (від  $1.2 \times 10^5$  до  $8 \times 10^5 M_{\odot}$ ). Це свідчить на користь ієрархічного сценарію еволюції галактик і доводить, що ізольовані галактики є надійним стандартом вивчення внутрішніх фізичних процесів у галактиці без впливу оточення. Доведено, що всі ізольовані АЯГ типу Sy1 (без слабких супутників) мають морфологічні ознаки перемички. Це означає, що перемичка має вирішальне значення для існування області широких емісійних ліній і є достатньою умовою для передачі газу та пилу з диска галактики в область активного ядра. Для окремих АЯГ вибірки вперше отримано характеристики в X-діапазоні за новими спостережними даними.

Виконано оцінки розподілу темної і баріонної матерії для X-скупчень галактик за даними обсерваторій Chandra XMM-Newton, встановлено параметричні залежності між розміром гало ТМ і повною масою скупчень на  $z < 1.4$ ; профілі густини ТМ для  $\sim 70\%$  досліджуваних скупчень галактик узгоджуються з  $\Lambda$ CDM-моделлю. Вперше проаналізовано параметричні залежності між світністю  $L_X$ , температурою  $T_X$  і масою  $M_g$  міжгалактичного газу 22 X-скупчень на  $0.4 < z < 1.4$ . У припущенні, що еволюція в співвідношеннях  $M-L$  і  $M-T$  для баріонної і темної матерії однакова, для залежності  $M_g \sim (1+z)^{A_{M_g L_X}} L^{\beta_{M_g L_X}}$  отримано параметри  $A_{M_g L_X} = -1.86 \pm 0.34$  та  $\beta_{M_g L_X} = 0.73 \pm 0.15$ , для  $L_X \sim (1+z)^{A_{L_X-T}} \times T^{\beta_{L_X-T}}$  отримано  $\beta_{L_X-T} = 2.55 \pm 0.07$  і  $A_{L_X-T} = 1.50 \pm 0.23$ , що свідчить про значиму еволюцію маси міжгалактичного газу і світності скупчення у порівнянні з кореляціями цих характеристик для близьких скупчень галактик.

Запропоновано нові алгоритми застосування методів машинного навчання а) для проведення автоматичної морфологічної класифікації галактик SDSS на  $0.02 < z < 0.06$ , де вперше отримано найбільшу статистичну значимість встановлення бінарної класифікації галактик методом випадкового лісу і методом опорних векторів ( $95.5 \pm 0.03\%$  і  $96.4 \pm 0.06$  відповідно); б) для відтворення просторового розподілу галактик за Зоною уникання Галактики, де вперше показано, що метод латання пошкоджених тривимірних зображень та генеративні змагальні нейронні мережі здатні відтворювати його за наявності даних про модулі відстаней у крайових ділянках Зони уникання.

Розроблено концепцію та сформовано наукові проекти Української віртуальної обсерваторії, результати яких увійшли до міжнародних баз даних. У рамках УкрВО впроваджено оригінальні методи пошуку оптичних аналогів гамма-спалахів і створення каталогів «поля зір» навколо положень їх ідентифікації з використанням даних ОЦА УкрВО, визначення орієнтації проєктивних на небесну сферу груп і скупчень галактик, обробки ПЗЗ-зображень з метою отримання положень небесних об'єктів у автоматичному режимі під час спостережень, обробки зображень скупчень галактик у X-діапазоні для подальшого вивчення розподілу густини баріонної і темної матерії в них.

Автору належить вирішальний внесок у формуванні в Україні нового напрямку досліджень з астроінформатики великомасштабних структур Всесвіту, який знайшов визнання на національному і міжнародному рівнях.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті у фахових реферованих виданнях

1. Babyk, Yu.V.; Del Popolo A.; Vavilova I.B. (2014). Chandra X-ray galaxy clusters at  $z < 1.4$ : Constraints on the inner slope of the density profiles. *Astron. Reports*, vol. 58, Issue 9, p. 587–610.
2. Babyk, I.; Vavilova, I. (2014). The Chandra X-ray galaxy clusters at  $z < 1.4$ : constraints on the evolution of  $L_X - T - M_g$  relations. *Astrophys. & Space Sci.*, vol. 349, Issue 1, p. 415–421.
3. Babyk, I.; Vavilova, I. (2014). The distant galaxy cluster XLSSJ022403.9-041328 on the  $L_X - T_X - M_g$  scaling relations using Chandra and XMM-Newton observations. *Astrophys. & Space Sci.*, vol. 353, Issue 2, p. 613–619.
4. Dobrycheva, D.V.; Melnyk, O.V.; Vavilova, I.B.; Elyiv, A.A. (2014). Environmental Properties of Galaxies at  $z < 0.1$  from the SDSS via the Voronoi Tessellation. *Odessa Astron. Publ.*, vol. 27, Issue 1, p. 26–27.
5. Dobrycheva, D.V.; Vavilova, I.B.; Melnyk, O.V.; Elyiv, A.A. (2018). Morphological Type and Color Indices of the SDSS DR9 Galaxies at  $0.02 < z \leq 0.06$ . *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*, vol. 34, Issue 6, p. 290–301.
6. Elyiv, A.; Melnyk, O.; Vavilova, I. (2009). High-order 3D Voronoi tessellation for identifying isolated galaxies, pairs and triplets. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, vol. 394, Issue 3, p. 1409–1418.
7. Melnyk, O.V.; Dobrycheva, D.V.; Vavilova, I.B. (2012). Morphology and color indices of galaxies in Pairs: Criteria for the classification of galaxies. *Astrophysics*, vol. 55, Issue 3, p. 293–305.
8. Melnyk, O.V.; Elyiv, A.A.; Vavilova, I.B. (2006). The structure of the Local Supercluster of galaxies revealed by three-dimensional Voronoi's tessellation method. *Kinemat. Fiz. Nebesn. Tel*, vol. 22, No. 4, p. 283–296.
9. Melnyk, O.V.; Elyiv, A.A.; Vavilova, I.B. (2009). Mass-to-light ratios for galaxy pairs and triplets in various environments. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*, vol. 25, Issue 1, p. 43–47.
10. Melnyk, O.V.; Vavilova I.B. (2008). Dark matter in very poor galaxy groups. *Advances in Space Research*, vol. 42, Issue 3, p. 591–595.
11. Pulatova, N.G.; Vavilova, I.B.; Sawangwit, U.; Babyk, Iu.; Klimanov, S. (2015). The 2MIG isolated AGNs. – I. General and multiwavelength properties of AGNs and host galaxies in the northern sky. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, vol. 447, Issue 3, p. 2209–2223.
12. Savanevych, V.E.; Briukhovetskyi, O.B.; Sokovikova, N.S.; Bezkrorny, M.M.; Vavilova, I.B.; Ivashchenko, Yu.M.; Elenin, L.V.; Khlamov, S.V.; Movsesian, Ia.S.; Dashkova, A.M.; Pogorelov, A.V. (2015). A new method based on the subpixel Gaussian model for accurate estimation of asteroid coordinates. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, vol. 451, Issue 3, p. 3287–3298.
13. Savanevych, V.E.; Khlamov, S.V.; Vavilova, I.B.; Briukhovetskyi, A.B.; Pohorelov, A.V.; Mkrtichian, D.E.; Kudak, V.I.; Pakuliak, L.K.; Dikov, E.N.; Melnik, R.G.; Vlasenko, V.P.; Reichart, D.E. (2018). A method of immediate detec-

tion of objects with a near-zero apparent motion in series of CCD-frames. *Astron. & Astrophys.*, vol. 609, id.A54, 11 pp.

14. Vavilova, I.B. (1999). Determining the orientation of a cluster of galaxies. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*, vol. 15, No. 1, p. 69–71.

15. Vavilova, I.B. (2016). Astrominformatics as a New Research Field: UkrVO and VIRGO Resources. *Odessa Astron. Publ.*, vol. 29, p. 109–115.

16. Vavilova, I.B.; Babyk, Iu.V. (2018). New Approach for Analysis of the X-ray Data in Cores of Galaxy Clusters: Binning on the Concentration Rings, Contour Binning, and Wavelet Transforms. *Odessa Astron. Publ.*, vol. 31, p. 239–246.

17. Vavilova, I.B.; Elyiv, A.A.; Vasylenko, M.Yu. (2018). Behind the Zone of Avoidance of the Milky Way: what can we restore by direct and indirect methods? *Radio Phys. Radio Astron.*, vol. 23, Issue 4, p. 244–257.

18. Vavilova, I.; Golovnya, V.; Andruk, V.; Pakuliak, L.; Yizhakevych, O.; Shatokhina, S.; Protsyuk, Yu.; Kazantseva, L.; Lukianchuk, V. (2014). The Scientific Use of the UKRVO Joint Digital Archive: GRBs Fields, Pluto, and Satellites of Outer Planets. *Odessa Astron. Publ.*, vol. 27, Issue 1, p. 65–66.

19. Vavilova, I.B.; Ivashchenko, G.Yu.; Babyk, Iu.V.; Sergijenko, O.M.; Dobrycheva, D.V.; Torbaniuk, O.O.; Vasylenko, A.A.; Pulatova, N.G. (2015). The astrocsmic databases for multi-wavelength and cosmological properties of extragalactic sources. *Kosm. nauka tehnol.*, vol. 21, Issue 5, p. 94–107.

20. Vavilova, I.B.; Karachentseva, V.E.; Makarov, D.I.; Melnyk, O.V. (2005). Triplets of Galaxies in the Local Supercluster. I. Kinematic and Virial Parameters. *Kinemat. Fiz. Nebesn. Tel*, vol. 21, No. 1, p. 1–16.

21. Vavilova, I.B.; Melnyk, O.V.; Elyiv, A.A. (2009). Morphological properties of isolated galaxies vs. isolation criteria. *Astron. Nachrichten*, vol. 330, No. 9/10, p.1004–1009.

22. Vavilova, I.B.; Pakuliak, L.K.; Protsyuk, Yu.I. (2010). Ukrainian Virtual Observatory (UkrVO). The Goals, Structure, and Tasks. *Kosm. nauka tehnol.*, vol.16, No. 5, p. 62–70.

23. Vavilova, I.B.; Pakuliak, L.K.; Protsyuk, Yu.I.; Shlyapnikov, A.A.; Savanevich, V.E.; Kondrashova, N.N.; Yatsenko, A.I.; Andruk, V.N. (2012). UkrVO Joint Digitized Archive and Scientific Prospects. *Baltic Astron.*, Vol. 21, p. 356–365.

24. Vavilova, I.B.; Pakuliak, L.K.; Protsyuk, Yu.I.; Virun, N.V.; Kashuba, S.G.; Pikhun, A.I.; Andrievsky, S.M.; Mazhaev, A.E.; Kazantseva, L.V.; Shlyapnikov, A.A.; Shulga, A.V.; Zolotukhina, A.V.; Sergeeva, T.P.; Miroshnichenko, A.P.; Andronov, I.L.; Breus, V.V.; Virnina, N.A. (2011). Ukrainian Virtual Observatory: Current Status and Perspectives of Development of Joint Archives of Observations. *Kosm. nauka tehnol.*, vol. 17, No. 4, p. 74–91.

25. Vavilova, I.B.; Pakulyak, L.K.; Shlyapnikov, A.A.; Protsyuk, Yu.I.; Savanevich, V.E.; Andronov, I.L.; Andruk, V.N.; Kondrashova, N.N.; Baklanov, A.V.; Golovin, A.V.; Fedorov, P.N.; Akhmetov, V.S.; Isak, I.I.; Mazhaev, A.E.; Golovnya, V.V.; Virun, N.V.; Zolotukhina, A.V.; Kazantseva, L.V.; Virnina, N.A.; Breus, V.V.; Kashuba, S.G.; Chinarova, L.L.; Kudashkina, L.S.; Epishev, V.P. (2012). Astrominformatics resource of the Ukrainian Virtual Observatory: Joint observational

data archive, scientific tasks, and software. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*, vol. 28, Issue 2, p. 85–102.

26. Vavilova, I.B.; Vasylenko, A.A.; Babyk, Iu.V.; Pulatova, N.G. (2015). X-Ray Spectral Properties of the Isolated AGNs: NGC 1050, NGC 2989, ESO 317-038, ESO 438-009. *Odessa Astron. Publ.*, vol. 28, Issue 2, p. 150–153.

### **Монографія**

27. Vavilova, I.B.; Bolotin, Yu.L.; Boyarsky, A.M.; Danevich, F.A.; Kobychiev, V.V.; Tretyak, V.I.; Babyk, Iu.V.; Iakubovskiy, D.A.; Hnatyk, B.I.; Sergeev, S.G. (2015). Dark matter: Observational manifestation and experimental searches. Vol. 3 of the three-volume monograph «Dark Energy and Dark Matter in the Universe», Ed. V.M. Shulga. Kyiv: Akadempriodyka, 375 pp.

### **Електронні бази даних і каталоги**

28. Babyk, Yu.V.; Del Popolo, A.; Vavilova, I.B. (2014). VizieR Online Data Catalog: Chandra X-Ray galaxy clusters at  $z < 1.4$ . VizieR On-line Data Catalog: J/AZh/91/679. Режим доступу <http://vizier.cfa.harvard.edu/viz-bin/VizieR?-source=J/AZh/91/679>.

29. Pulatova, N.G.; Vavilova, I.B.; Sawangwit, U.; Babyk, Iu.; Klimanov, S. (2015). The 2MIG isolated AGNs. – I. General and multiwavelength properties of AGNs and host galaxies in the northern sky. NASA/IPAC Extragalactic database, Refcode 2015MNRAS.447.2209P. Режим доступу [https://ned.ipac.caltech.edu/inrefcode?refcode=2015MNRAS.447.2209P&search\\_type=Search](https://ned.ipac.caltech.edu/inrefcode?refcode=2015MNRAS.447.2209P&search_type=Search).

### **Статті у матеріалах конференцій та інших виданнях**

30. Chesnok, N.; Sergeev, S.; Vavilova I. (2010). Photometric and kinematic properties of non-isolated and isolated AGNs. Proc. of the 4th Gamow International Conference on Astrophysics and Cosmology After Gamow and the 9th Gamow Summer School «Astronomy and Beyond: Astrophysics, Cosmology, Radio Astronomy, High Energy Physics and Astrobiology», Eds. Chakrabarti S.K., Bisnovaty-Kogan G.S., Zhuk A.I., AIP Confer. Proceedings, vol. 1206, p. 328–334.

31. Dobrycheva D.V.; Vavilova I.B.; Melnyk O.V., Elyiv A.A. (2017). Machine learning technique for morphological classification of galaxies at  $z < 0.1$  from the SDSS. e-print arXiv:1712.08955.

32. Melnyk, O.V.; Elyiv, A.A.; Vavilova, I.B. (2007). 3-D Voronoi's Tessellation as a Tool for Identifying Galaxy Groups. In: «Galaxy Evolution Across the Hubble Time», Eds. F. Combes and J. Palous, Proc. of the International Astronomical Union, IAU Symposium 235, held 14-17 August, 2006 in Prague, Czech Republic. Cambridge: Cambridge University Press, p. 223.

33. Pulatova, N.; Vavilova I.; Berczik, P. (2013). Statistical study of isolated and non-isolated AGNs in the Local Universe. In: «Feeding Compact Objects: Accretion on All Scales», Proc. of the International Astronomical Union, Eds. C.M. Zhang, T. Belloni, M. M'endez and S.N. Zhang, IAU Symposium, Vol. 290, p. 297–298.

34. Vavilova I.B. (1997). Cluster and wavelet analysis for detachment of the structure of galaxy cluster: comparison. In: «Data Analysis in Astronomy», Proc. of the Fifth Workshop. Ettore Majorana Centre for Scientific Culture, Erice, Italy,

27 Oct – 3 Nov, 1996. Eds. V. Di Gesu, M.J.B. Duff, A. Heck, M.C. Maccarone, L. Scarsi, H.U. Zimmerman. World Scientific Press, p. 297–302.

35. Vavilova I.B. (2000). Wavelet analysis as approach to recognize abundance zone in galaxy distribution. *Kinemat. Fiz. Nebesn. Tel, Suppl.*, No. 3, p. 155.

36. Vavilova, I.B. (2018). Tests of the gravitational redshift effect in space-born and ground-based experiments. *Space Sci. & Technol.*, vol. 24, No. 1, p. 31–48.

37. Vavilova I.; Chesnok N.; Melnyk O. (2010). Search for the Multiwavelength AGN Properties in Dependence on Environment. 38th COSPAR Scientific Assembly. Held 18-15 July 2010, in Bremen, Germany, p. 4.

38. Vavilova I.B.; Elyiv A.A.; Dobrycheva D.V.; Melnyk O.V. (2018). Voronoi tessellation in a spatial galaxy distribution. *Institute of Mathematics Conferences, Sixth International Conference on Analytic Number Theory and Spatial Tessellation, Kyiv, Ukraine*, id. 68.

39. Vavilova I.B.; Melnik O.V. (2005). Voronoi tessellation for galaxy distribution. *Mathematics and its Applications*, vol. 55, p. 203–212.

40. Vavilova, I.B.; Vasylenko, A.A.; Babyk, Iu.V.; Pulatova, N.G. (2016). Multi-wavelength properties and SMBH's masses of the isolated AGNs in the Local Universe. In: «Active Galactic Nuclei: what's in a name?» Proc. of a conference held 27 June – 1 July, 2016 in ESO, Garching bei München, Germany, id.105. Режим доступу <https://zenodo.org/record/60643#.WKgz-tSLTGg>.

41. Vavilova, I.B.; Yatskiv, Ya.S.; Pakuliak, L.K.; Andronov, I.L.; Andruk, V.M.; Protsyuk, Yu.I.; Savanevych, V.E.; Savchenko, D.O.; Savchenko, V.S. (2017). UkrVO Astroinformatics Software and Web-services. «Astroinformatics», Proc. of the International Astronomical Union, IAU Symposium, vol. 325, p. 361–366.

### СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

42. Александров, А.Н.; Вавилова, И.Б.; Жданов, В.И.; Жук, А.И.; Кудря, Ю.Н.; Парновский, С.Л.; Федорова, Е.В.; Яцкив, Я.С. (2015). *Общая теория относительности: признание временем*. Киев: Наукова думка, 332 с.

43. Вавілова І.Б. (1998). *Великомасштабна структура Всесвіту: спостереження і методи дослідження*. К.: РВЦ Київський університет, 107 с.

44. Горобець, Ю.І.; Кучко, А.М.; Вавилова, І.Б. (2008). *Фрактальна геометрія у природознавстві*. Київ: Наукова думка, 2008. 232 с.

45. Караченцев И.Д. (1987). *Двойные галактики*. М.: Наука, 248 с.

46. Кудря, Ю.М.; Вавилова, І.Б. (2016). *Позагалактична астрономія. Книга 1. Галактики: основні фізичні властивості*. Київ: Наукова думка, 344 с.

47. Яцків, Я.С.; Александров, О.М.; Вавилова, І.Б.; Жданов, В.І.; Кудря, Ю.М.; Парновський, С.Л.; Федорова, О.В.; Хміль, С.І. (2005). *Загальна теорія відносності: випробування часом*. Київ: ГАО НАН України, 288 с.

48. Blumenthal, G.R.; Faber, S.M., Primack, J.R., Rees, M.J. (1984). Formation of galaxies and large-scale structure with cold dark matter. *Nature*, vol. 311, p. 517–525.

49. Ball, N. M.; Brunner, R. J. (2010). *Data Mining and Machine Learning in Astronomy*. *Int. J. Mod. Physics D*, <https://arxiv.org/pdf/0906.2173.pdf>.

50. Banerji, M.; Lahav, O.; Lintott, C.J. et al. (2010). Galaxy Zoo: reproducing galaxy morphologies via machine learning. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, vol. 406, Issue 1, p. 342–353.
51. Bullock, J.S.; Dekel, A.; Kolatt, T.S. et al., (2001). A Universal Angular Momentum Profile for Galactic Halos. *Astrophys. J.*, vol. 555, Issue 1, pp. 240–257.
52. Goodfellow, I.J.; Pouget-Abadie, J.; Mirza, M. et al. (2014). Generative Adversarial Networks. eprint arXiv:1406.2661.
53. Karachentseva, V. E.; Mitronova, S. N.; Melnyk, O. V.; Karachentsev, I. D. (2010). Catalog of isolated galaxies selected from the 2MASS survey. *Astrophysical Bulletin*, vol. 65, Issue 1, pp. 1–17.
54. Kraan-Korteweg, R.C. (2005). Cosmological Structures behind the Milky Way. *Reviews in Modern Astronomy*, vol. 18, p.48–75.
55. Mandelbrot, B.B. (1977). *Fractals: Form, Chance and Dimension*. San Francisco, 1977.
56. Navarro, J.F.; Frenk, C.S.; White, S.D.M. (1997). A Universal Density Profile from Hierarchical Clustering. *Astrophys. J.*, vol. 490, Issue 2, pp. 493–508.
57. Novosyadlyj, B.; Pelykh, V.; Shtanov, Yu.; Zhuk (2013). A. Dark Energy: Observational Evidence and Theoretical Models. Vol. 1. of the three-volume monograph «Dark Energy and Dark Matter in the Universe», Ed. V.M. Shulga. Kyiv: Akadempriodyka, 2013, 380 p.
58. Peebles, P.J.E. (1980). *The large-scale structure of the Universe*. Princeton University Press, 1980.
59. Peebles, P.J.E. (1982). Large-scale background temperature and mass fluctuations due to scale-invariant primeval perturbations. *Astrophys. J.*, vol. 263, L1.
60. Sanders, J.S.; Fabian A.C.; Allen S.W. (2000). X-ray colour maps of the cores of galaxy clusters. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, vol. 318, Issue 3, p. 733–746.
61. Schawinski, K.; Zhang, Ce; Zhang, H. (2017). Generative adversarial networks recover features in astrophysical images of galaxies beyond the deconvolution limit. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, vol. 467, Issue 1, p. L110–L114.
62. Sergeev A.V.; Sergeeva T. P. (2003). A system for a search of astronomical objects and events in astronomical plate archives: the main principles, aims, and purposes. *Kinemat. Fiz. Nebesn. Tel*, vol. 19, No. 3, p. 272–281.
63. Storrie-Lombardi, M.C.; Lahav, O.; Sodre, L., Jr.; Storrie-Lombardi, L.J. (1992). Morphological Classification of Galaxies by Artificial Neural Networks. *Mon. Not. R Astron. Soc*, vol. 259, Issue 1, 8 p.
64. Vavilova, I.; Dobrycheva, D.; Vasylenko, M.; Elyiv, A.; Melnyk, O. (2020). Multiwavelength extragalactic surveys: examples of data-mining. Chapter 16 (18 p.) in «Knowledge Discovery in Big Data from Astronomy and Earth Observation». Eds. P. Skoda, F. Adam. Elsevier.
65. Véron-Cetty, M.-P.; Véron, P. (2010). A catalogue of quasars and active nuclei: 13th edition. *Astron. Astrophys.*, vol. 518, id. A10.
66. Zasov A.V.; Saburova A.S.; Khoperskov A.V.; Khoperskov S.A. (2017). Dark matter in galaxies. *Usp. Fizich. Nauk*, vol. 187, No. 1, p. 3–44.

## АНОТАЦІЯ

**Вавилова І.Б. Астроінформатика великомасштабних структур Всесвіту.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 – Астрофізика, радіоастрономія (10 – Природничі науки; 104 – Фізика та астрономія). – Головна астрономічна обсерваторія НАН України; Головна астрономічна обсерваторія НАН України, Київ, 2020.

Метою дослідження є визначення фізичних властивостей і отримання еволюційних залежностей між головними характеристиками великомасштабних структур Всесвіту (морфологія, кінематика, вміст темної матерії, просторовий розподіл галактик на  $z < 0.1$  і скупчень галактик на  $z < 1.4$ ) шляхом розробки, верифікації та застосування математичних методів із використанням астроінформаційного ресурсу великих баз даних спостережень. Доведено ефективність застосування методу мозаїки Вороного вищих порядків для встановлення критеріїв ізольованості малонаселених груп, що дозволило отримати вміст темної матерії в них на  $z < 0.1$  за співвідношенням «маса–світність» та інші динамічні/кінематичні параметри. Виконано комплексне дослідження мультихвильових властивостей 2MIG ізольованих галактик із активними ядрами на масштабах близького Всесвіту і показано, що для більшості з них маси центральних надмасивних чорних дір та енергетичні параметри у всіх спектральних діапазонах значно менші за параметри галактик, що знаходяться у щільному оточенні. Запропоновано нові алгоритми застосування методів машинного навчання для проведення бінарної автоматичної морфологічної класифікації галактик SDSS на  $z < 0.06$  і для відтворення просторового розподілу галактик за Зоною уникання Галактики. Проаналізовано астроінформаційний ресурс для мультихвильових досліджень галактик; розроблено концепцію і впроваджено окремі наукові проекти Української віртуальної обсерваторії.

**Ключові слова:** галактики, великомасштабна структура Всесвіту, Зона уникання, темна матерія, астроінформатика, машинне навчання.

## АННОТАЦИЯ

**Вавилова И.Б. Астроинформатика крупномасштабных структур Вселенной.** – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.02 – Астрофизика, радиоастрономия (10 – Естественные науки; 104 – Физика и астрономия). – Главная астрономическая обсерватория НАН Украины; Главная астрономическая обсерватория НАН Украины, Киев, 2020.

Целью исследования является определение физических свойств и получение эволюционных зависимостей между главными характеристиками крупномасштабных структур Вселенной (морфология, кинематика, содержание темной



материи, пространственное распределение галактик на  $z < 0.1$  и скоплений галактик на  $z < 1.4$ ) путем разработки, верификации и применения математических методов с использованием астроинформационного ресурса больших баз данных наблюдений. Доказана эффективность метода мозаики Вороного высших порядков для установления критериев изолированности малонаселенных групп, что позволило получить содержание темной материи в них на  $z < 0.1$  по соотношению «масса–светимость» и другие динамические и кинематические параметры. Выполнено комплексное исследование мультиволновых свойств 2MIG изолированных галактик с активными ядрами на масштабах близкой Вселенной и показано, что для большинства из них массы центральных сверхмассивных черных дыр и энергетические параметры во всех спектральных диапазонах значительно меньше параметров галактик, находящихся в плотном окружении. Предложены новые алгоритмы применения методов машинного обучения для проведения бинарной автоматической морфологической классификации галактик SDSS на  $z < 0.06$  и для воспроизведения пространственного распределения галактик за Зоной избегания Галактики. Проанализирован астроинформационный ресурс для исследований галактик; разработана концепция и внедрены отдельные научные проекты Украинской виртуальной обсерватории для исследований Галактики.

**Ключевые слова:** галактики, крупномасштабная структура Вселенной, Зона избегания, темная материя, астроинформатика, машинное обучение.

## ANNOTATION

**Vavilova I.B. Astrominformatics of the large-scale structures of the Universe.** – Qualification scientific work on the rights of manuscripts.

Thesis for a Doctor of Sciences degree in Physics and Mathematics, speciality 01.03.02 – Astrophysics, Radioastronomy (10 – Natural Sciences; 104 – Physics and Astronomy). – Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine; Main Astronomical Observatory of the NAS of Ukraine, Kyiv, 2020.

The purpose of the study is to determine the physical properties and to obtain the evolutionary dependencies between the main characteristics of the large-scale structures of the Universe (morphology, kinematics, dark matter content, the spatial distribution of galaxies at  $z < 0.1$  and clusters of galaxies at  $z < 1.4$ ) through the development, verification and application of mathematical methods using the astroinformatics resource of large databases of multiwavelength observations.

For the first time, the effectiveness of the developed Voronoi higher order tessellation method was proved for establishing the isolation criteria of large-scale structures of the Universe and detecting the spatial distribution of galaxies on scales of sparsely populated groups, which made it possible to obtain the dark matter content of such groups at  $z < 0.1$  using the «mass–luminosity» ratio and other dynamic and kinematic parameters of these galaxy systems.

For the first time, a comprehensive study of the multiwavelength properties of isolated 2MIG galaxies with active nuclei on the scales of the near Universe was performed. It was shown that the masses of central supermassive black holes and the energy parameters in all spectral ranges are much smaller than those of galaxies located in dense environment. This result is in a favor of the scenario of secular evolution of galaxies and proves that isolated galaxies are the reliable standard for studying internal physical processes in a galaxy without the influence of the environment. It was discovered that all the isolated AGNs of Sy1 type (without faint satellites) have bars as the morphological features: this indicates that the bulge is crucial for the existence of a region of broad emission lines and is sufficient for the transfer of gas and dust from the galaxy's disk through bar into the active nuclear region. For some isolated galaxies, their characteristics were first obtained in the X-ray range according to new observational data from XMM-Newton, Swift, and NuSTAR space observatories.

New algorithms for the application of machine learning methods are proposed a) for the binary automatic morphological classification of SDSS galaxies at  $z < 0.06$ , where the Random Forest and the Vector Support Machine methods revealed the greatest statistical significance at the level of  $(95.5 \pm 0.03) \%$  and  $(96.4 \pm 0.06) \%$  respectively; b) to reproduce the spatial distribution of galaxies behind the Zone of Avoidance of our Galaxy, where the 3D damage and generative competitive neural networks are able to recover it in the presence of distance moduli data for the edge regions of this Zone.

The distribution of dark and baryonic matter for 129 X-ray Chandra galaxy clusters was analyzed. It allowed to determine the dark matter density profiles, the dependence of the «concentration parameter (size of dark matter halo) – total mass», and the evolutionary relationships “luminosity – temperature – mass of intercluster gas” at  $z < 1.4$ . There is obtained  $M_g \sim (1+z)^{-1.9} \times L_X^{0.73}$  and  $L_X \sim (1+z)^{1.5} \times T^{2.55}$  that allows to conclude about significant evolution of the luminosity and intercluster gas as compare with these parameters for X-ray galaxy clusters at low redshifts.

An analysis of the existing astrophysical resource of multiwavelength studies of large-scale structures of the Universe was performed. A concept was developed and some scientific projects of the Ukrainian Virtual Observatory for study of our Galaxy were conducted, first of all, the Joint Digitized Archive of astrophotographs which covers period of observations since 1890 years. The new proposed 2D methods are concerning with the determination of preferred orientation of galaxy system, the detection of new small Solar System bodies in automatic mode with CCD observations, the search of optical analogs of gamma-rays, and the use of wavelet analysis for processing images of X-ray galaxy clusters to reveal subclustering structures of a baryon matter.

Some of the obtained results are implemented in the educational process for students (textbooks on extragalactic astronomy) and included into the Visier Online Data Catalogue and NASA/IPAC Extragalactic Database.

**Keywords:** galaxies, large-scale structure of the Universe, Zone of Avoidance, dark matter, astrophysics, machine learning.