

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ГОЛОВНА АСТРОНОМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ

**ЕЛИЇВ АНДРІЙ АНДРІЙОВИЧ**

УДК 524.7+52-735

**КОСМІЧНІ ВОЙДИ:  
СТРУКТУРА І ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В НИХ ТА НАВКОЛО**

01.03.02 – Астрофізика, радіоастрономія  
10 – Природничі науки; 104 – Фізика та астрономія

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

Київ – 2022

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця у формі наукової доповіді.  
Робота виконана в Головній астрономічній обсерваторії  
Національної академії наук України, м. Київ.

**Науковий консультант:**

доктор фізико-математичних наук, професор,  
член-кореспондент НАН України

**Вавилова Ірина Борисівна,**

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України,  
завідувач відділу позагалактичної астрономії та астроінформатики.

**Офіційні опоненти:**

доктор фізико-математичних наук, професор

**Новосядлий Богдан Степанович,**

Астрономічна обсерваторія Львівського національного  
університету імені Івана Франка МОН України,  
головний науковий співробітник;

доктор фізико-математичних наук, професор

**Жданов Валерій Іванович,**

Астрономічна обсерваторія Київського національного  
університету імені Тараса Шевченка МОН України,  
завідувач відділу астрофізики;

доктор фізико-математичних наук, старший дослідник

**Баннікова Олена Юрївна,**

Радіоастрономічний інститут НАН України,  
провідний науковий співробітник.

Захист відбудеться \_\_\_\_\_ на засіданні Спеціалізованої вченої ради Д  
26.208.01 при Головній астрономічній обсерваторії НАН України за адресою:  
03143, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27, ГАО НАН України.

Початок засідань о \_\_\_\_\_ годині.

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

Автореферат розіслано «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ р.

Вчений секретар Спеціалізованої вченої ради  
кандидат фізико-математичних наук

І.В. Кулик

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Космічні войди, або порожнини, займають гігантські простори Всесвіту з низькою концентрацією галактик. Вони були виявлені близько 40 років тому назад, але їхнє систематичне вивчення стало можливим лише в останнє десятиріччя з появою сучасних спектроскопічних оглядів галактик всього неба. Через свої гігантські об'єми, характерну форму, динаміку і низьку густину видимої матерії, вони є унікальними лабораторіями для позагалактичної астрофізики та космології. Складна ієрархія войдів, взаємні перетини, піно-подібна структура на різних масштабах Всесвіту роблять їх цікавими об'єктами з точки зору застосування геометричних і топографічних методів та технологій нейромереж.

У дослідженнях з астрофізики високих енергій войди розглядають як «шосе» для поширення релятивістських частинок, де присутність ненульового магнітного поля та позагалактичного фонового інфрачервоного випромінювання є відкритим питанням. Войди є важливими для тестування еволюційних моделей, оскільки вони дозволяють вивчати ізольовані галактики, здебільшого, карликові галактики пізніх типів, і малонаселені групи без впливу оточення та порівнювати їх з галактиками, що знаходяться у скупченнях.

Войди можуть бути використані для ефективного тестування космологічних моделей та оцінки космологічних параметрів. Зокрема, спостережуваний дефіцит карликових галактик у войдах близького Всесвіту суперечить космологічному сценарію з холодною темною матерією. Їхні фізичні властивості залежать від природи темної енергії та зародкового поля густини, з якого вони розвинулися, зокрема, форма войдів дуже чутлива до рівняння стану темної енергії та вмісту темної матерії.

Точність космологічних тестів і еволюційних моделей великомасштабної структури Всесвіту залежить від критеріїв виокремлення цих космічних порожнин. Підтвердженням цьому є велика кількість розроблених алгоритмів для їхнього пошуку. Ключовим параметром для всіх типів шукачів войдів є положення галактик в просторі з добре вимірними відстанями, в ідеалі, не збуреними пекулярними і колективним рухами галактик. Тому важливими є розробка методів встановлення модулів відстаней до галактик, що окреслюють войди або знаходяться у них, з точністю кращою, ніж може забезпечити метод червоного зміщення.

Відомо, що оточення галактик впливає не тільки на такі їхні властивості як колір, морфологічний тип, світність, темп зореутворення, а також і на наявність активного ядра у центрі галактики (АЯГ) та, власне, на спектральні особливості випромінювання АЯГ. На сьогодні відсутня остаточна відповідь на запитання, що саме грає домінуючу роль в еволюції галактик та активності ядра – внутрішня еволюція чи оточення галактик. Однак, очевидно, що уніфікована схема АЯГ, згідно з якою всі типи АЯГ повинні знаходитися в однакових оточеннях, не враховує

секулярної (вікової) еволюції і активно переглядається. З цієї точки зору дослідження властивостей АЯГ у войдах, філаментах, скупченнях галактик та в інших структурах у контексті еволюції галактик, а також і зворотного ефекту впливу АЯГ, а особливо їхнього підтипу – блазарів, на процеси всередині космічних порожнеч є важливими.

Завдяки високій світності в Х-ділянці спектру (рентгенівському), АЯГ можуть бути виявлені в широкому діапазоні червоних зміщень, аж до  $z = 4$ , на відміну від нормальних галактик. Отже, ці об'єкти є надійними мітками космічної структури (войдів, філаментів, стін, скупчень) і зручним інструментом для вивчення еволюційних явищ у Всесвіті. В останні двадцять років проведено декілька десятків глибоких і широких оглядів неба у Х-діапазоні з метою детектування скупчень галактик та АЯГ, а також проведення їх спостережень у широкому діапазоні довжин хвиль від радіо до гама. Такі огляди дозволяють не тільки всебічно вивчати властивості різних об'єктів, їхнє оточення і властивості, особливості кластеризації, але й вікову еволюцію (залежність властивостей від червоного зміщення), а також детектувати цікаві рідкісні об'єкти. Одним із прикладів таких об'єктів є гравітаційно-лінзові квазари, пошук яких був здійснений у межах цієї роботи на базі рентгенівського багатохвильового поля XXL у 50 кв. град.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дослідження виконувалися під час роботи здобувача в 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.), «Чисельний аналіз фізичних характеристик і еволюції скупчень галактик, галактик і галактичних підсистем» (№ держ. реєстрації 0113U008323, 2014–2018 рр.), «Розвиток та застосування кластерних технологій для мультимасштабного динамічного моделювання та аналізу структури локального Всесвіту» (№ держ. реєстрації 0110U007860, 2011–2013 рр.);

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.), «Властивості баріонної і небаріонної матерії в галактиках і скупченнях галактик» (№ держ. реєстрації 0112U004455, 2012 р.) і «Астрофізичні прояви темної матерії» (№ держ. реєстрації 0110U003747, 2010–2011 рр.);

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.);

наукові проекти Державного фонду фундаментальних досліджень України «Популяція галактик в близьких космічних лакунах» (№ держ. реєстрації 0113U004477, 2013 р.), «Просторовий розподіл та фізичні властивості галактик в областях з екстремально низькою густиною матерії» (№ держ. реєстрації 0111U006527, 2011–2012 рр.); стипендія Президента України для молодих учених (2011–2012 рр.); наукові проекти «АЯГ та їхнє оточення» під час стажування в Університеті м. Льєж (Бельгія) впродовж 2009–2013 рр., «Виявлення космічних порожнеч без вимірювань густини» в Університеті м. Болонья (Італія) впродовж 2013–2015 рр., «Застосування методів машинного навчання для визначення відстаней до галактик» INAF, Мілан (Італія) у 2016–2021 рр.

**Метою дисертаційної роботи** є комплексне дослідження властивостей космічних порожнин, а саме: розробка методів виокремлення порожнин у розподілі великомасштабних структур Всесвіту; аналіз високоенергетичних процесів, що відбуваються у войдах, у тому числі, моделювання магнітного поля та властивостей і стійкості електромагнітних лавин; визначення багатохвильових властивостей галактик у порожнинах та навколо. Робота охоплює дослідження великомасштабних структур (галактик, скупчень галактик, войдів, філаментів) у широкому спектральному діапазоні від інфрачервоного до гамма-випромінювання.

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

- Розроблено алгоритм пошуку войдів, який показує кращу точність за існуючі аналоги.
- Вперше розроблено метод відновлення відстаней до галактик за доступними спостережуваними даними на основі методів машинного навчання.
- Створено інструменти та програмне забезпечення для чисельного моделювання розвитку електромагнітних лавин у войдах та формування зображень блазарів у гамма-діапазоні.
- Доведено стабільність релятивістських електрон-позитронних пучків, викликаних гамма-фотонами від блазарів.
- Вперше досліджено кореляційні властивості АЯГ, спостережуваних у глибокому рентгенівському огляді неба XMM-LSS космічного телескопу XMM-Newton.
- Виконано пошук кандидатів у гравітаційно-лінзові системи у рентгенівському полі XXL.
- Застосовано метод мозаїки Вороного другого та третього порядків для виділення пар і триплетів галактик, що дало можливість проаналізувати їхні властивості у залежності від ступеня ізольованості системи.

**Об'єкти дослідження:** войди, галактики, скупчення галактик, гравітаційно-лінзовані квазари, активні ядра галактик, квазари, великомасштабна структура Всесвіту.

**Предмет дослідження:** властивості космічних войдів на червоних зміщеннях від Місцевого Всесвіту до  $z = 2$ ; електромагнітні лавини від блазарів та вимірювання магнітного поля в войдах; кореляційні властивості галактик з активними ядрами та їхнє оточення; гравітаційно-лінзові системи квазарів та їх пошук; методи встановлення відстаней до галактик та виділення структур галактиках/АЯГ.

**Методи дослідження.** У роботі використовувалися методи чисельного моделювання, зокрема, метод Монте-Карло; машинного навчання – моделі різних типів регресій та нейронних мереж; 2D і 3D методи мозаїки Вороного для просторового розподілу великомасштабних структур Всесвіту, ієрархічний метод виділення груп/агломератів галактик та АЯГ; методи обробки спостережуваних даних, зокрема апертурної фотометрії та моделювання функції розсіювання точки, а також статистичних оцінок для встановлення достовірності отриманих результатів та методи порівняння змодельованих параметрів зі спостережуваними даними.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

Розроблено нові методи та алгоритми для пошуку космічних войдів на основі динамічних властивостей великомасштабної структури Всесвіту: застосовано апроксимацію Лагранжа-Зельдовича для відтворення поля густини матерії низької концентрації та для виокремлення космічних порожнин; створено та апробовано відповідне програмне забезпечення.

Розроблено новий геометричний шукач порожнин та виділено в Місцевому Всесвіті войди та гіпервойди, створено алгоритми для виділення агломератів галактик, що дозволило дослідити населення космічних войдів Місцевого Всесвіту.

Проведено дослідження високоенергетичних процесів у космічних войдах, а саме, електромагнітних лавин від гамма-фотонів, випромінених особливим типом АЯГ – блазарами. Виконано аналітичний опис основних характеристик лавини. Створено чисельні моделі лавин, фотон-фотонної анігіляції та релятивістських електрон-позитронних пучків.

За результатами вперше проведених моделювань показано, що за спостереженнями гало навколо блазарів в гамма діапазоні можна оцінити величину магнітного поля в космічних войдах та характеристики самих блазарів. Доведена стійкість пучків електрон-позитронних пар в космічних порожнинах. Показано, що електромагнітні лавини від блазарів не впливають на термічну історію міжгалактичного простору войдів, крізь які вони поширюються.

Вперше запропоновано використовувати метод редукції двоточкової кореляційної функції для відновлення орбіт галактик під час еволюції та формування космічних структур.

Вперше запропоновано метод мозаїки Вороного вищих порядків для виділення ізольованих галактик, пар та триплетів галактик.

Проведено обробку та аналіз даних позагалактичного рентгенівського огляду XXL/XMM-LSS, виконаного супутником XMM-Newton. Створено програмне забезпечення для аналізу кореляційних властивостей розподілу АЯГ, порівняно оточення АЯГ 1-го та 2-го типів, а також радіо і не-радіо АЯГ, з високою і низькою світністю. Створено інструмент для пошуку надлишку густини навколо точкових рентгенівських джерел в оптичному діапазоні. Виявлено особливості просторового розподілу АЯГ щодо великомасштабних структур Всесвіту.

Вперше зроблено пошук гравітаційно-лінзових систем у рентгенівському полі XXL та проведено оцінку їхньої населеності.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблено алгоритми та програмне забезпечення, яке може бути використане для обробки майбутніх оглядів позагалактичних джерел, отриманих за даними наземних і космічних телескопів, для уточнення космологічних параметрів Всесвіту та його великомасштабної структури.

Розроблений шукач войдів включено в програмне забезпечення обробки спостережних даних космічній місії телескопа «Евклід».

Запропоновані та розвинуті у роботі математичні методи досліджень розподілу войдів, галактик і їхніх угруповань та спектрофотометричні методи обробки спостережних даних галактик достовірно відтворюють властивості цих об'єктів і можуть бути застосовані у подальших наукових дослідженнях, зокрема і при постановці конкурсної тематики, бакалаврських, магістерських і дисертаційних робіт. Монографію «DarkEnergyandDarkMatterintheUniverse» у трьох томах, де том 3 «Darkmatter: Observationalmanifestationandexperimentalsearches» 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/>). Робота здобувача «Космічні войди великомасштабної структури Всесвіту: виокремлення, населення, активні ядра галактик та магнітні поля» отримала Премію Президента України для молодих вчених у 2018 році.

Результати дослідження використовуються в астрономічних установах національних університетів України, Інституті теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, Інституті прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України та за кордоном (наприклад, в Національній обсерваторії Афін, на факультеті фізики та астрономії Болонського університету, французькому науково-дослідницькому інституті CEA-Saclay), у міжнародному проекті дослідження мультихвильового огляду неба XXL-XMM (THE ULTIMATE XMM EXTRAGALACTIC SURVEY), що охоплює 50 кв. градусів. Мета цього проекту – дослідження еволюції скупчень галактик та АЯГ і уточнення космологічних пара-

метрів. Над проектом працює колаборація з більше ніж ста наукових співробітників з різних міжнародних установ. Також результати було використано у проекті Galaxy And Mass Assembly (GAMA) з вивчення властивостей та еволюції галактик та їх скупчень на малих червоних зміщеннях і проекті (Microlensing Network for the Detection of Small Terrestrial Exoplanets (MiNDSTer)), де пошукач брав участь у спостереженнях АЯГ.

Практичну цінність отриманих результатів підтверджують наукометричні показники здобувача: у Scopus включено 52 публікації, на які є 861 посилання,  $h=17$ ; у базі даних SAONASA/ADS на 88 наявних публікацій є 1179 посилань,  $h=21$ .

**Достовірність та обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій.** Достовірність і обґрунтованість результатів досліджень базуються на застосуванні загальноприйнятих та добре перевірених фізичних, математичних та чисельних методів, зокрема  $\chi^2$ , найменших квадратів, тестами Колмогорова-Смірнова та Стьюдента, а також порівнянням різних методів, застосованих до однієї вибірки. Наукові положення обґрунтовано та підтверджено публікацією результатів у рецензованих фахових журналах і матеріалах міжнародних конференцій та посиланнями на ці статті іншими авторами.

**Особистий внесок здобувача.** Результати дисертаційної роботи опубліковано в основних статтях [1–13], додаткових статтях [14–33], що висвітлюють тему дисертації, розділах у монографіях [34–38], а також в матеріалах і тезах конференцій [39–44]. У всіх статтях, де автор є першим автором, здобувачу належить постановка задачі, обґрунтування, основні розв'язки та розробка програмних кодів для обчислення. Інше по статтям подано далі.

У статтях [1, 2, 3] здобувач виконував усі розрахунки і комп'ютерні програми, написав текст статей. У статті [4] здобувач брав участь у постановці задачі, виконав 90 % розрахунків і програмного забезпечення, написав текст статті. В статті [5] здобувач приймав участь у постановці задачі, виконав 50 % розрахунків та усі комп'ютерні програми, брав участь у написанні тексту статті. В статті [6] здобувач виконав усі розрахунки і комп'ютерні програми, написав текст статті, приймав участь в обговоренні результатів. У статтях [7, 8] здобувач виконав 50 % розрахунків і комп'ютерних програм, приймав участь в обговоренні результатів. У статтях [9, 10] брав участь у розрахунках, написанні тексту статей і обговоренні результатів, а також написав програмні коди. В статті [11] здобувач створив комп'ютерну програму, написав текст статті, приймав участь в обговоренні та інтерпретації результатів. У статті [12] здобувач брав участь у постановці задачі, створив комп'ютерну програму для метода Вороного вищих порядків, брав участь в обговоренні та інтерпретації результатів і написанні тексту статті. В статті [13] здобувач брав участь у створенні комп'ютерних програм, зокрема ієрархічного методу для виділення агломератів, обговоренні та інтерпретації результатів. У статтях



[14–26] здобувач брав участь в обговоренні та інтерпретації результатів у рамках колаборацій проектів XXL та GAMA як один з координаторів цих проектів. У статтях [27, 28] здобувач брав участь в обчисленнях, обговоренні та інтерпретації результатів. У статті [29] здобувач брав участь у спостереженнях, обговоренні та інтерпретації результатів у якості колаборатора проекту MiNDSTEr. У статтях [30, 31] здобувач брав участь в обчисленнях, обговоренні та інтерпретації результатів та написанні статей. У статті [32] здобувач брав участь в постановці задачі, обчисленнях, а також в обговоренні та інтерпретації результатів. У статті [33] здобувач брав участь у створенні комп'ютерних програм, обговоренні та інтерпретації результатів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дослідження доповідалися на міжнародних наукових конференціях, семінарах ГАО НАН України та інших установ в Україні та за кордоном. Зокреманатакихконференціях як IAU Symposium 362 Predictive Power of Computational Astrophysics as a Discovery Tool, Virtual Meeting, France, 2021; The European Week of Astronomy and Space Science (EWASS) –2017 (Prague, Czech Republic), 2019 (Lyon, France), 2020–2021 (Leiden, The Netherlands; XIII–XV, XIX, XXI Gamov Summer School “Astronomy and beyond: Astrophysics, Cosmology, Cosmomicphysics, Astroparticle Physics, Radioastronomy and Astrobiology” – 2013–2015, 2019, 2021 (Odesa, Ukraine); The International Symposium “Astronomical Surveys and Big Data 2” (ASBD-2), Byurakan, Armenia, 2020; XX International Scientific and Technical Conference “Artificial Intelligence and Intellegent Systems”, Kyiv, Ukraine, 2020; International Conference “Astronomy and Space Physics” – 2020, 2021 (Kyiv, Ukraine); XIII–Всеукраїнській студентській конференції “Фізика та науково-технічний прогрес”, Харків, Україна, 23–24 квітня 2019; Institute of Mathematics Conferences, Sixth International Conference on Analytic Number Theory and Spatial Tessellations, Kyiv, Ukraine, 2018; Meeting of XXL collaboration, Florence, Italy, 2016 p.; IAU Symposium No. 308 The Zeldovich Universe: Genesis and Growth of the Cosmic Web in Tallinn, Estonia, 2016; Advanced Workshop on Cosmological Structures from Reionization to Galaxies: Combining Efforts from Analytical and Numerical Methods, Trieste, Italy, 2015 p.; Euclid clustering meeting, London, UK, 2015 p.; “Cosmic voids in the next generation of galaxy surveys” workshop, Columbus, USA, 2015 p.; Астрономія та фізика космосу в Київському університеті. Міжнародна конференція в рамках VIII Всеукраїнського фестивалю науки 27–30 травня 2014 року. Київ; Meeting of XXL collaboration, Sesto, Italy, 2014 p.; International symposium “Multi-wavelength-surveys: Galaxy Formation and Evolution from the early universe to today”, Dubrovnik, Croatia, 2014 p.; AGN meeting of XXL collaboration, Athens, Greece, 2014 p.; Meeting of XXL collaboration, Bonn, Germany, 2013 p.; Conference “Half a century of X-ray Astronomy, Mykonos, Greece, 2012 p.; Space and ground-based imaging in astrophysics, “Actions de recherche concertées” annual meeting, Liege, Belgium,

2012 p.; Meeting of XXL collaboration, Meudon, France, 2012 p.; Meeting of XXL collaboration, Bonifacio, France, 2011 p.; Meeting of XXL collaboration, Sacley, France, 2011 p.; 17th Young Scientists' Conference on Astronomy and Space Physics, Kyiv, Ukraine, 2010 p.; X International Conference Relativistic Astrophysics, Gravitation and Cosmology, Kyiv, Ukraine, 2010 p.

та семінарах: семінари департаменту астрофізики, геофізики і океанографії Львівського університету, Львів, Бельгія, 2011, 2012 р.; семінар інституту теоретичної фізики Рурського університету, Бохум, Німеччина, 2012 р.; семінар відділу позагалактичної астрономії та астроінформатики астроінформатики Головної астрономічної обсерваторії НАН України, Київ, Україна, 2009, 2010, 2011, 2013, 2015, 2018, 2020, 2021 р.; семінар астрономічної обсерваторії Ягеллонського університету, Краків, Польща, 2008 р.; семінар департаменту фізики та астрономії Болонського університету, Болонья, Італія, 2013, 2014, 2015 р.; семінар Національного Інституту Астрофізики INAF, Мілан, Італія 2019 р.; семінар ISDC відділення астрономічного департаменту Женевського університету, Версуа, Швейцарія, 2008 р..

**Публікації.** Результати дисертаційної роботи викладено у 44 публікаціях, з яких 33 статі [1–33] опубліковано у таких виданнях відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports: «Astronomy and Astrophysics» – 16 (Q1), «Monthly Notices of the Royal Astronomical Society» – 8 (Q1), «Physical Review D» – 1 (Q1), «Astrophysical Journal Letters» – 1 (Q1), «Astrophysical Journal» – 2 (Q1), «Publications of the Astronomical Society of Australia» – 1 (Q2), «Astronomische Nachrichten» – 1 (Q3), «Memorie della Societa Astronomica Italiana» – 1 (Q4), «Astrophysics» – 1 (Q4), «Space Science and Technology» – 1 (Scopus), а також 4 розділи у англomовних монографіях [34–37] видавництва Akadempriodyka (1), Springer (1), Elsevier (2), та 7 публікацій [38–44] представлено в тезах і матеріалах міжнародних та вітчизняних конференцій.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаної літератури зі 118 найменувань і додатку. Повний обсяг дисертації – 198 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця у формі наукової доповіді, яка містить вступ, де обґрунтовано актуальність наукової проблеми, обраної для дослідження, визначено її мету, задачі та методи розв'язання поставлених задач, вказано на зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами і темами, сформульовано наукову новизну дослідження, показано наукову і практичну цінність отриманих результатів, наведено дані про особистий внесок здобувача, апробацію роботи, публікації.

У Розділі 1 “Войди як складник Великомасштабного Всесвіту” запропоновано новий алгоритм виділення войдів, що базується на динамічних і кластерних критеріях опису войдів в Лагранжевих координатах та мінімізують внесок фактору низької концентрації галактик. Цей алгоритм у двох варіантах було застосовано до рандомізованого каталогу галактик.

Загалом, відомі шукачі можна розбити на три класи в залежності від типу критеріїв виокремлення войдів. Перший клас базується на безпосередньому вимірюванні густини галактик в певному об’ємі, де войд є областю простору без галактик, або з концентрацією галактик нижче певної границі. Другий клас використовує критерії, де войди є геометричними фігурами, наприклад, сферами, багатогранниками тощо. Шукачі войдів третього класу базуються на динамічних критеріях, де галактики розглядаються як тестові частинки для космічного поля швидкостей. В нашій роботі [1] було запропоновано новий алгоритм виділення войдів третього класу, що базується на динамічних і кластерних критеріях опису войдів у Лагранжевих координатах.

**1.1. Динамічний та некорельований шукач войдів.** У роботі [46] показано, що наївний підхід вимірювання концентрації галактик в сферичних шарах навколо войдів призводить до великої кількості порожніх шарів без галактик і, як наслідок, до систематичної недооцінки профілю густини. Перевагою шукачів войдів третього класу є те, що войди можуть бути визначені в Лагранжевих координатах, що значно покращує проблему статистичного шуму та полегшує теоретичну інтерпретацію результатів.

У роботі [1] нами запропоновано новий алгоритм виділення войдів третього класу, що базується на динамічних і кластерних критеріях виділення войдів в Лагранжевих координатах, що мінімізують вклад фактору низької концентрації галактик у них. Основна ідея полягає в спеціальній рандомізації вибірки галактик для досягнення однорідного первинного розподілу галактик та подальшого використання індивідуальних векторів зміщення галактик після даної процедури. Така процедура відповідає зворотній в часі еволюції великомасштабної структури Всесвіту. Іншими словами, вектор зміщення показує, як далеко і в якому напрямі необхідно запустити частинку-галактику з однорідного первинного розподілу, щоб отримати спостережну зараз великомасштабну структуру. В роботі використано стандартну  $\Lambda$ CDM модель Всесвіту, де темна матерія є основним гравітуючим елементом (27%), навколо центрів концентрації якої (гало) утворюються галактики. Описаний в роботі шукач LZVF (Lagrangian Zeldovich Void Finder) використовує апроксимацію Лагранжа-Зельдовича для відновлення взаємного розташування галактик на початку еволюції.

Він полягає в припущенні, що рух галактик відбувається з дотриманням умови мінімізації дії  $S$ , яка є інтегралом Лагранжіана по часу. На практиці, застосування цього підходу вимагає генерацію вибірки випадкових галактик розміром і об'ємом, що відповідають реальній вибірці. З'єднання реальних галактик з випадковими, дає змогу побудувати векторне поле зміщення, таким чином, щоб сума квадратів відстаней всіх пар реальна-випадкова галактика була мінімальною.

Для верифікації даного підходу був розроблений так званий некорельований шукач войдів UVF (Uncorrelated Void Finder), в якому поле зміщень будувалося, виходячи лише з геометричних міркувань. Як відомо, в сучасну космологічну епоху розподіл галактик є сильно неоднорідним. Відхилення від неоднорідності прямо характеризується просторовою двоточною кореляційною функцією, що вимірює наскільки далеким розподіл є від Пуассонового. З другого боку, припускається, що в ранні епохи розподіл маси був однорідним, без просторової кореляції, що формально характеризується станом, коли кореляційна функція рівна 0 на всіх лінійних масштабах. Ефективним шляхом досягти цього є т. зв. метод "відпалу", що полягає в модифікації стану системи до конфігурації з мінімальною внутрішньою енергією.

У нашому ітераційному підході ми зміщували галактики у випадковому напрямку на 0.5 Мпк/г. Якщо амплітуда кореляційної функції зменшувалася, ми зберігали таке зміщення, в протилежному випадку, повертали назад дану галактику на її попереднє місце. Такі ж маніпуляції виконувалися з наступною галактикою і так далі з усіма. Ми зупиняли ітерації над всім каталогом, коли амплітуда кореляційної функції наблизилася достатньо близько до нуля на всіх лінійних масштабах. На різних кроках можна було спостерігати випадкове блукання галактик від областей з високою густиною до областей з низькою концентрацією галактик. Вектор зміщення  $\Psi$  з'єднує Ейлерові (теперішні спостережувані координати) і Лагранжеві (отримані випадкові координати) після закінчення ітерацій. Оскільки відновлення Лагранжевих координат не є унікальним, тому поле зміщень залежить від початкового стану генератора випадкових чисел. Виконано 10 відновлень поля зміщення і усереднено отримані векторні поля ядром Гауса з масштабом 1.5 Мпк/г, що відповідає ефективній відстані між галактиками використаного каталогу.

Отже, обидва описані підходи LZVF і UVF забезпечують векторне поле зміщень, отримане з фізичних та статистичних міркувань, відповідно. Їхні порівняння можна бачити на Рис. 1 (верхня панель). Як видно, обидва підходи дають подібну картину, де потоки векторів зміщень напрямлені від скупчень та філаментів галактик до войдів. Далі, поле зміщень було використане для побудови поля дивергенції. Порівняння полів дивергенції можна бачити на нижній панелі Рис. 1.

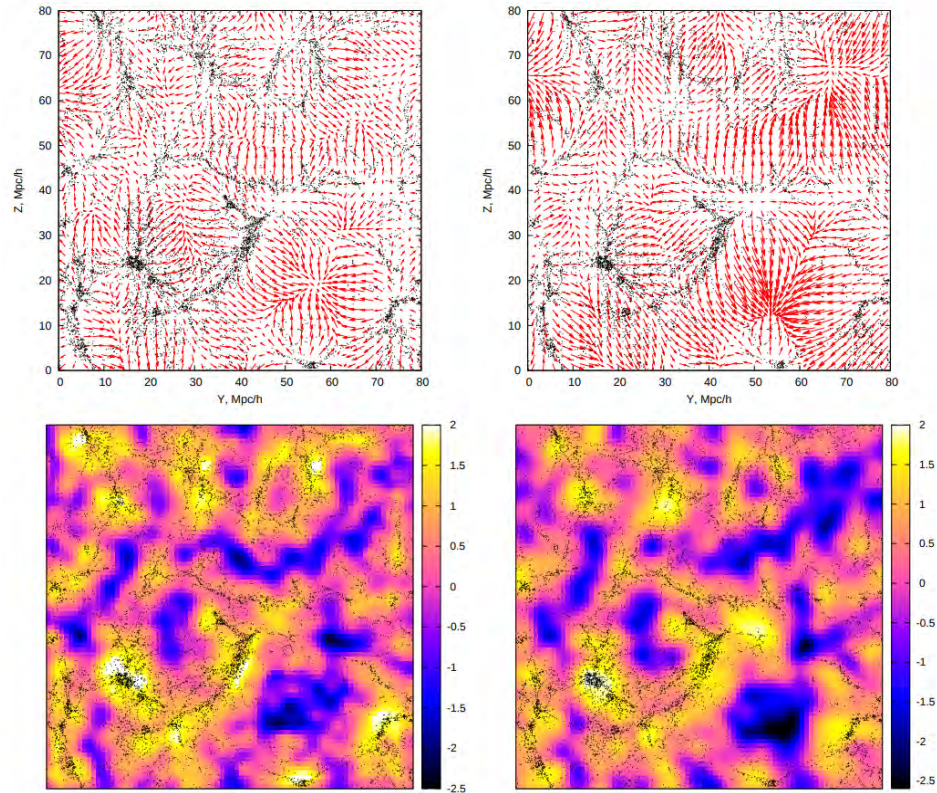


Рис. 1. Реконструйоване поле зміщення  $\Psi$  (верхні панелі) та його дивергенції  $\Theta$  (нижні панелі), отримані за допомогою двох шукачів, запропонованих у цій роботі, UVF (ліва панель) та LZVF (права панель). Розмір області, що відображається, становить  $80 \times 80$  Мпк/г, товщиною 5 Мпк/г. Чорні круги репрезентують частинки темної матерії.

У такому підході войди визначаються як області негативної дивергенції поля зміщення в Лагранжевих координатах, це відповідає стоку галактик при зворотній еволюції. Для тестування методу було використано каталог гало холодної темної матерії N-тіл моделювання CODECS для стандартної космологічної моделі  $\Lambda$ CDM, де частинки темної матерії є основними трасерами локальної густини маси. Отримані результати порівняно з класичним шукачем войдів ZOBOV (Zones Bordering On Voidness) з роботи [47], застосованого до тієї самої вибірки гало (Рис. 2). Цей шукач войдів побудований на основі виділення контрасту концентрації галактик за допомогою мозаїки Вороного. Видно, що войди, виділені LZVF і UVF, краще накладаються на неоднорідності великомасштабної структури Всесвіту, ніж виділенні шукачем ZOBOV. Показано добре узгодження двох запропонованих шукачів між собою та знайдено, що профіль дивергенції поля зміщення є менш флуктуаційним, ніж звичайний профіль концентрації галактик, а отже їхнє накладання є більш стійким та придатним для космологічних тестів (Рис. 3).



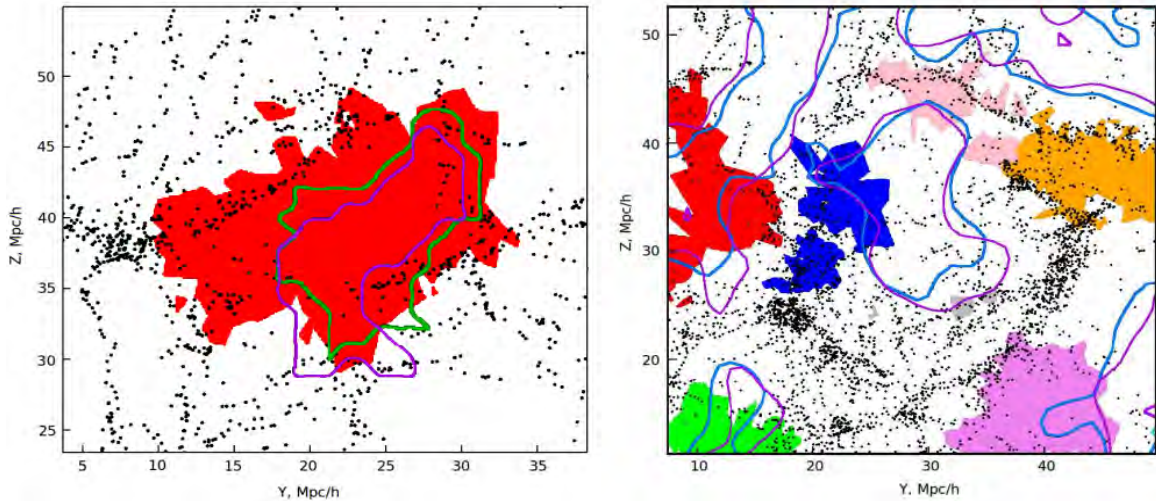


Рис. 2. Порівняння воїдів, виділених нашим алгоритмом (лінії) та ZOBOV (заповненні площі). Ліворуч приклад узгодження обох підходів, праворуч – розходження.

Крім того, відношення сигнал-шум для профілю дивергенції в центральній частині воїдів для обох шукачів є на 60% вищим, ніж для профілів густини у випадку ZOBOV воїдів. Для LZVF та UVF також були проведені тестові об'єднання суміжних воїдів, ефективні радіуси яких менші за певний граничний  $R_{lim}$ . Ці та інші результати показують, що запропоновані шукачі воїдів є хорошими альтернативами до існуючих, і можуть зробити значний вклад для покращення точності космологічних тестів, що базуються на статистиці воїдів, вимірюванні асиметричностей накладених воїдів.

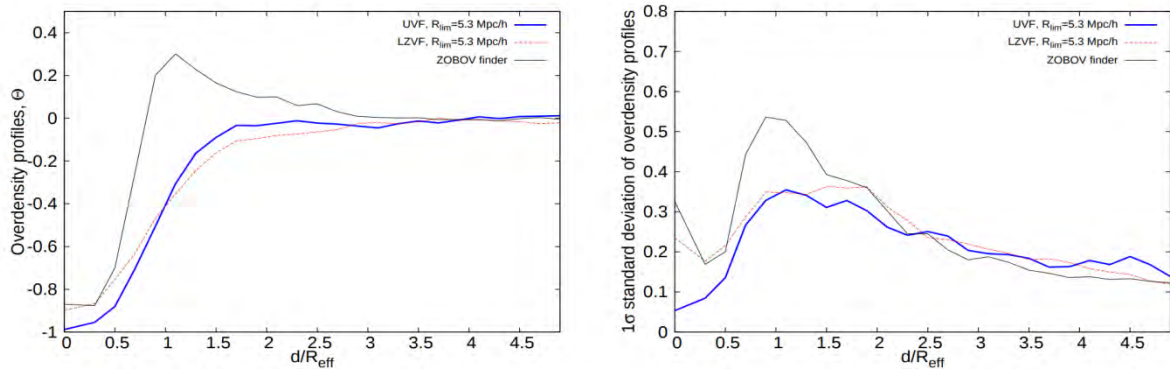


Рис. 3. Порівняння між середніми профілями надлишку густини (ліва панель) та відповідним  $1\sigma$  відхиленням (права панель) воїдів знайдених двома нашими шукачами UVF та LZVF і класичним шукачем ZOBOV.

Індивідуальні войди вибрані нашими шукачами та ZOBOV мають подібну форму трьохосних еліпсоїдів. Еліптичність войда, отриманого після накладання багатьох войдів з подібними ефективними радіусами, виміряна в полі дивергенції ( $0.97 \pm 0.04$ ) є набагато ближчою до очікуваної одиниці ніж виміряна для класичних ZOBOV войдів в полі густини галактик ( $0.92 \pm 0.04$ ). Ці результати показують, що наші шукачі войдів є конкурентоспроможними порівняно до існуючих, і можуть зробити значний вклад для покращення точності космологічних тестів, що базуються на суперпозиції войдів, а саме для проведення Алькок-Пачинського тесту для уточнення космологічних параметрів, насамперед, густини матерії  $\Omega_m$ .

Дана робота була виконана напередодні запуску місії Евклід. Цей широкий позагалактичний огляд космічної місії Європейського Космічного Агентства буде багатообіцяючим для застосування динамічних шукачів войдів. Очікуване покриття спектрального огляду галактик буде становить 15000 кв. гр., він буде містити більш ніж 50 млн. галактик з вимірними променевими швидкостями в діапазоні червоних зміщень  $0.7 < z < 2.1$  до граничної зоряної величини  $m_H = 24$ , типова відстань між галактиками очікується від 4 to 15 Мпк/г, об'єм огляду буде в 500 раз більшим за об'єм вибірки SDSS. Це зробить спектральний огляд Евклід ідеальною лабораторією для вивчення властивостей та еволюції космічних порожнин, зокрема, запропонованими шукачами войдів.

**Розділ 2. Модуль відстані до галактик та оцінки ізольованості малонаселених систем галактик. 2.1 Обчислення модуля відстані для галактик Місцевого Всесвіту.** Вимірювання відстаней до галактик, з вищою точністю, ніж дає червоне зміщення, є важливим для астрофізики, зокрема для виокремлення войдів, груп та скупчень галактик, тестування космологічних моделей. Реконструкція поля швидкостей галактик має вирішальне значення для картографування Всесвіту, дослідження елементів великомасштабної структури Всесвіту.

Традиційно відстані для галактик вимірюються за модулем відстані  $m-M$ , різницею між видимою та абсолютною зоряними величинами. Теоретичні оцінки абсолютної величини  $M$  галактик, зорь чи їхніх скупчень використовують як індикатори (свічі) відстаней. Первинні індикатори базуються на стандартних свічках, що представляють собою спеціальні типи зірок із відомими світностями: цефеїди, RR Lyrae, наднові типу Ia тощо. Ці методи дають відстані з похибкою від 4 % для галактик Місцевої групи [48] та до 10 % для більш віддалених. Вторинними індикаторами є емпіричні відношення Таллі-Фішера та Фундаментальної Площини (FP) з типовими точностями відстаней  $\sim 20$  % і зазвичай застосовуються для галактик на  $z \sim 0.1 - 0.2$ .

Основна ідея, висвітлена в роботі [2], полягає у використанні максимально доступних спостережуваних даних для масивів галактик з червоним зміщенням  $z < 0.2$ . Для відновлення модуля відстані  $m-M$  ми використовували різні спостережні характеристики, такі як видимі зоряні величини в смугах U, B, I, K, поверхневу

якравість, кутові розміри, променеву швидкість, показники кольору як аналог морфологічних типів та положень галактик на небі. Вплив деяких параметрів не є прямим, але ми враховували їх, оскільки вони могли б мати неявний вплив на модуль відстані ( $m-M$ ).

У цій роботі ми використали каталог відстаней, незалежних від червоного зміщення з позагалактичної бази даних NASA/IPAC [49]. Також каталог містить відстані для 141249 галактик, що засновані на вторинних методах, таких як Таллі-Фішера, Фундаментальної площини та інші, які ми використали для порівняння точності наших методів. Вищезазначені характеристики галактик для тренування моделей ми завантажили з бази даних HyperLeda [50]. Радіальні швидкості галактик обмежувались  $1500 \text{ км/с} < V_{LG} < 60000 \text{ км/с}$ .

До цієї вибірки галактик ми застосували п'ять моделей машинного навчання, де у якості пояснювальних змінних використали спостережувані характеристики галактик, а у якості цільової змінної модуль відстані, отриманий з точністю краще ніж 0.50 з.в. Ми порівняли результати застосованих моделей: лінійної, поліноміальної,  $k$ -найближчих сусідів, регресії градієнтного підсилення та нейромережевої (багатошаровий перцептрон). Ми розглянули переваги та недоліки кожного з них і оцінили похибку  $m-M$  з каталогу відстаней, визначених незалежно від червоних зміщень. Також ми розглянули випадок, коли променева швидкість недоступна, намагаючись відновити  $m-M$  з доступних даних спостережень. Перевагою нашого підходу є те, що ми використовуємо зручні для спостереження базові спостережувані дані, відомі для великого масиву галактик.

Було показано, що модель нейронної мережі з двома прихованими шарами дає точніший результат, ніж інші моделі. На рис. 4 зображена залежність передбачуваного модуля відстані від отриманого зі спостережень традиційними методами для найкращої моделі. Отримана середньоквадратична похибка становить  $0.35^m$ , що відповідає відносній похибці 16% для розглянутих червоних зміщень  $z < 0.2$ . На рис. 5 показано залежність середньоквадратичної похибки від червоних зміщень для різних вибірок. Це співмірно з похибками методів Таллі-Фішера та FP. Зауважимо, що для близьких галактик метод дає ще кращу точність: похибка зростає з 0.2 до 0.4 при радіальних швидкостях нижче 10000 км/с, що можна пояснити зменшенням внеску високоточних вимірювань методами зір типу цефеїдів та RR Ліри на ( $m-M$ ). У разі відсутності  $V_{LG}$ , наш метод дає похибку  $0.44^m$  (20%), яка все ще прийнятна для дослідження великомасштабної структури Всесвіту та еволюції галактик. Зокрема, цей альтернативний підхід корисний тоді, коли у нас немає радіальної швидкості, але достатньо фотометричних та інших даних.



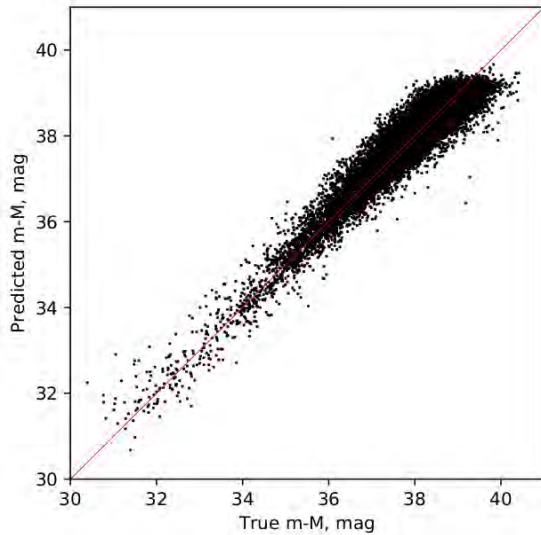


Рис. 4. Залежність передбачуваного модуля відстані від реального модуля відстані

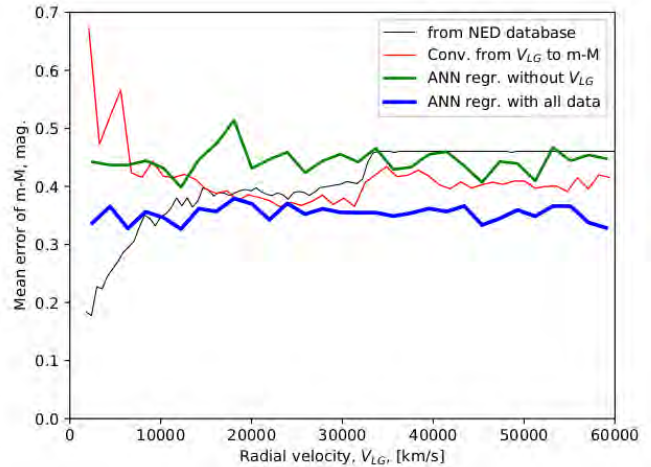


Рис. 5. Середньоквадратична похибка модуля відстані  $m-M$  у залежності від променевої швидкості для вибірок галактик: з бази даних NED, після перетворення  $V_{LG}$  до  $m-M$ , використовуючи регресію ANN без  $V_{LG}$  та використовуючи регресію ANN з усіма доступними атрибутами.

Запропонований метод машинного навчання корисний, зокрема, для вимірювання відстаней до галактик з  $V_{LG} > 10000$  км/с, де основні методи не працюють. Тому регресійна модель на основі нейронної мережі, розроблена в роботі [2], є конкурентоспроможною у порівнянні з загальноживаними вторинними методами вимірювань ( $m-M$ ), такі як FP та відношення Галлі-Фішера.

**2.2. Метод мозаїки Вороного вищих порядків для виявлення впливу оточення на характеристики галактик та їх малонаселених систем.** Мозаїка Вороного [56] є зручним і універсальним геометричним інструментом, що широко використовувалась в астрофізиці для різних задач, наприклад, виділення войдів у великомасштабній структурі Всесвіту [46, 57], моделювання анізотропії мікрохвильового фону [58], виділення груп галактик різної населеності [59]. У роботі [32] мозаїка Вороного була застосована для виявлення “сфери впливу” галактики на своє оточення, де “сфера впливу” рахувалася як об’єм комірки Вороного, див. також огляди [34–36].

В алгоритмі найпростішої мозаїки Вороного першого порядку ключовим параметром є об’єм комірки Вороного. Цей параметр характеризує густину оточення даної галактики - чим менше об’єм комірки, тим ближче до галактики знаходяться

її сусіди і навпаки - галактики у великих комірках є ізольованими. У роботі [12] ми вперше застосували 3D метод мозаїки Вороного другого та третього порядків для виділення пар і триплетів галактик, відповідно, з вибірки 6786 галактик SDSSDR5 з обмеженням по променевої швидкості  $3000 \leq V_{LG} \leq 9500$  км/с.

На відміну від методу Вороного першого порядку, метод Вороного другого порядку передбачає пошук комірки, яка належить не одній галактиці, а зразу двом галактикам, причому всі точки об'єму цієї комірки просторово ближче до цих двох галактик, ніж до будь якої іншої галактики вибірки (див. рис. 6). Аналогічно, у методі Вороного третього порядку ми шукали комірки, що містять одночасно три галактики. Об'єми комірок, як і в методі мозаїки Вороного першого порядку, відповідали за ступінь ізольованості даної пари чи триплету.

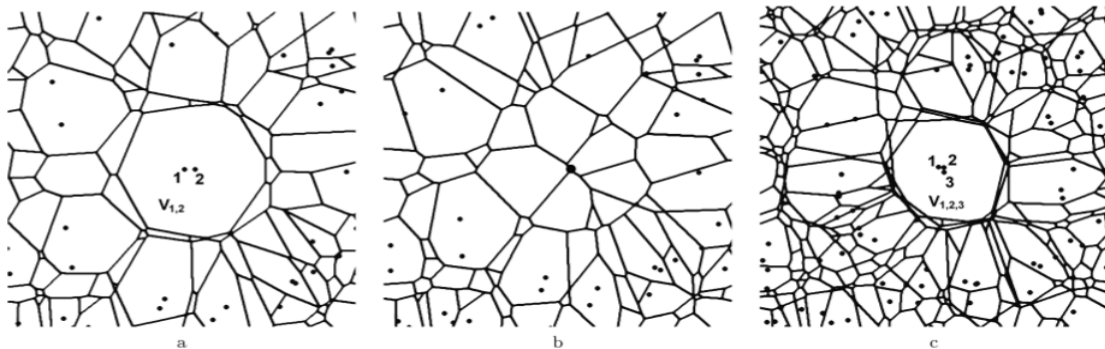


Рис. 6. Різні конфігурації галактик (2D варіант мозаїки Вороного для наглядності): ізольована близька пара (а) і ізольована одиночна галактика (б) у мозаїці другого порядку та ізольований тріплет у мозаїці третього порядку (с).

Було знайдено, що галактики в ізольованих парах та триплетах мають світність у два рази вищу, ніж ізольовані галактики. Також, групи галактик у більш тісному оточенні - наприклад, що знаходяться у скупченнях, мають більшу дисперсію швидкостей та відношення маси до світності. Завдяки визначенню ступеня ізольованості галактики методом Вороного, було підтверджено відмінності в оточенні галактик ранніх та пізніх типів: чим щільніше оточення навколо галактики, тим ймовірніше, що вона має ранній тип, ніж пізній.

**Розділ 3. Галактики з активними ядрами та особливості їхнього великомасштабного розподілу.** Вивчення об'єктів великомасштабної структури Всесвіту на далеких відстанях призводить до необхідності створення глибоких оглядів позагалактичних об'єктів. Такі спостереження проводяться практично у всіх доступних діапазонах довжин хвиль. Рентгенівські спостереження становлять важливу їхню частину через слабке міжгалактичне поглинання при таких високих енергіях. Більше 95% всіх виявлених об'єктів в рентгенівському діапазоні далеко від площини

Галактики є точковими джерелами, переважно АЯГ, інші в основному протяжні джерела - насамперед скупчення і групи галактик. Завдяки високій рентгенівській світності, АЯГ можуть бути виявлені в широкому діапазоні червоних зміщень, аж до  $z = 4$ , на відміну від нормальних галактик. Отже, ці об'єкти є відмінними мітками космічної структури: войдів, філаментів, стін, скупчень і зручним інструментом для вивчення еволюційних явищ у Всесвіті. Для всебічного вивчення АЯГ необхідним є створення статистично репрезентативних вибірок, спостережуваних єдиним інструментом у неперервній ділянці неба. З цією метою у різні роки було проведено декілька десятків спостережуваних програм на протязі останніх 25 років з різним покриттям та глибиною: наприклад, неглибокий огляд неба ROSAT нараховував 670 АЯГ, більша частина яких має червоні зміщення до  $z=0.5$  [52], глибокий огляд XMM-COSMOS, спостережуваний на двох кв. градусах, містить  $\sim 1800$  АЯГ здебільшого до  $z=4$  [53]. Безпрецедентну глибину до  $z=6$  функції світності по всьому небу забезпечить німецько-російська місія eROSITA [54], але спостережувані дані залишаться недоступні принаймні наступні декілька років.

Поле рентгенівського огляду проміжної глибини XXL складається з двох ділянок в північній і південній півкулях по 25 кв. гр. кожна, спостережуваних з експозицією близько 10 год космічним телескопом XMM-Newton. Огляд містить близько 40000 джерел у м'якому (0.5–2 кеВ) та 25000 в жорсткому (2–10 кеВ) рентгенівському діапазоні до граничних потоків (при ймовірності детектування 50%):  $F_{0.5-2 \text{ кеВ}} = 3 \cdot 10^{-15} \text{ ерг}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$  та  $F_{2-10 \text{ кеВ}} = 1 \cdot 10^{-14} \text{ ерг}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$  [19, 23]. Огляд налічує декілька тисяч АЯГ з повнотою до  $z = 1$  [13].

Огляд XXL є унікальною лабораторією для вивчення АЯГ та скупчень/груп галактик, оскільки крім покриття в X-діапазоні спектру, огляд містить дані спостережень від радіо, інфрачервоного до ультрафіолетового діапазонів [16, 22, 26, 27], а також спектральні спостереження червоних зміщень [18, 24]. Зокрема, вивчення кластеризації АЯГ (розділ 3.1) дає інформацію про флуктуації густини речовини на різних масштабах, важливу для уточнення космологічних параметрів, з'ясування впливу оточення на галактики та АЯГ, дозволяє уточнити уніфіковану схему АЯГ [51] та зробити висновки щодо еволюції цих об'єктів (розділ 3.2). XXL огляд є також плацдармом для пошуку та дослідження гравітаційно-лінзових об'єктів – таку спробу ми зробили, описана в розділі 3.3.

Аналіз населення скупчень галактик на  $z \sim 1$  актуальний для розуміння еволюції галактик та АЯГ у тісному оточенні та впливу оточення на зореутворення [14, 15, 17, 20, 21, 25]. Наприклад, в роботі [21] було показано, що кількість АЯГ у суперкластерах значно перевищує очікуване число АЯГ для населення поля, а частка АЯГ у скупченнях антикорелює з масою скупчення [15]. При цьому, АЯГ у скупченнях проміжних мас не є активнішими, ніж у загальному полі [25]. Було також показано, що оточення грає головну роль у кількості галактик з активних зоре-

утворенням у скупченнях [17], а злиття галактик – у зростанні маси центральної найяскравішої галактики скупчення [20].

**3.1 Кореляційні властивості розподілу АЯГ в рентгенівському огляді XXL.** Найпростіша версія уніфікованої моделі [51] передбачає, що різні типи АЯГ, такі як Сейферти 1 та 2 типів, а також АЯГ з широкими та вузькими емісійними лініями (їх ще називають незатмарені та затмарені або 1 та 2 типів) є одними і тими ж самими об'єктами по-різному орієнтованими до променя зору. Однак, багато авторів, цитованих у [3, 13, 33] знаходили різні відмінності у властивостях та оточенні двох типів АЯГ, що може бути пояснено 1) спостережуваними ефектами селекції, 2) насправді різними властивостями цих об'єктів або 3) різними стадіями еволюції одних і тих самих об'єктів. Таким чином, дослідження оточення та властивостей АЯГ є актуальним для уточнення уніфікованої схеми АЯГ.

Найбільш поширеним підходом для вивчення кластеризації АЯГ є вимірювання двоточної кутової кореляційної функції. Також, схема кластеризації популяції AGN може надати важливу інформацію щодо космографії флуктуацій густини матерії на різних масштабах та космологічних параметрів. Метою роботи [3] було вивчення великомасштабної структури незатмарених та затмарених рентгенівських АЯГ (5700 точкових джерел вибраних в м'якому рентгенівському діапазоні 0.5–2 кеВ і близько 2500 в жорсткому 2–10 кеВ) за допомогою глибокого рентгенівського огляду XMM - LSS розміром 11 кв. гр., що знаходиться у північному полі XXL (рис. 7), за допомогою метода двоточної кореляційної функції.

Для коректного кореляційного аналізу необхідно моделювати випадкові розподіли джерел з такими ж селекційними ефектами як і в спостережуваних даних. Для цієї мети ми виконали чисельні моделювання:  $p$  - ймовірність детектування джерела певного потоку  $S$  при спостереженні з експозицією  $T$ , на відстані  $R$  від центра поля зору телескопа, при певному фоновому рівні космічного випромінювання  $B$ . Отже залежність ефективної площі покриття від потоку:

$$A(S) = \int p(S, R, T, B) d\Omega$$

а співвідношення  $\log(N)$ – $\log(S)$  впливає з диференційованого розподілу детектованих джерел в огляді по потоку. Як видно з Рис. 8  $\log(N)$ – $\log(S)$  XMM-LSS добре узгоджується з результатами для інших рентгенівських оглядів. Для обчислення кутової кореляційної функції ми генерували випадкові каталоги джерел, враховуючи селекційні ефекти при спостереженні та ймовірності детектування з чисельних моделювань. Для обрахунку кутової кореляційної функції ми використали підходи Гамільтона та Ланді — Шалеї. Діапазон виміру кореляційної функції був від 20'', що відповідає точності визначення координат джерел на краю поля зору камери

ЕРІС супутника XMM-LSS, до  $12000''$ , що є характерним поперечним розміром поля. Отриману функцію  $w(\theta)$  було апроксимовано степеневим співвідношенням:

$$w(\theta) = (\theta_0/\theta)^{\gamma-1}$$

де  $\theta_0$  – кутовий масштаб кореляції, а  $\gamma$  — показник степеневого нахилу. Для перетворення з кутової кореляційної функції в просторову використано інтегральне рівняння Лімбера.

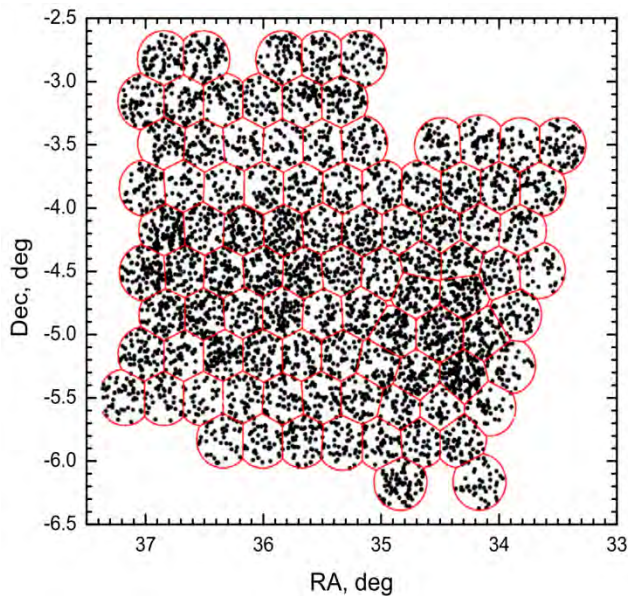


Рис. 7. Розподіл точкових джерел спостережуваних в рентгенівському м'якому діапазоні з поля XMM-LSS. Червоним кольором позначені межі між окремими спостереженнями телескопу XMM-Newton, складається з 94 суміжних спостережень експозицією від 10 до 40 ксек (межі окремих полів розділені методом мозаїки Вороного). Загальне поле містить близько 5700 точкових джерел в м'якому рентгенівському діапазоні (0.5 - 2 кеВ) і близько 2500 в жорсткому (2 - 10 кеВ).

Виявлено значні кутові кореляції для повної вибірки XMM-LSS, які можуть бути апроксимовані степеневим законом з нахилом  $\gamma = 1.81 \pm 0.02$  та масштабом кореляції  $\theta_0 = 1.3'' \pm 0.2''$  для м'якого і  $\gamma = 2.00 \pm 0.04$ ,  $\theta_0 = 7.3'' \pm 1.0''$  для жорсткого діапазону. Підтверджено, що ступінь кластеризації зростає зі збільшенням граничного мінімального потоку (Рис. 9, права панель). Просторова кореляційна довжина збільшується від 7 до 18 Мпк/г для джерел в м'якому діапазоні та від 10 до 13 Мпк/г в жорсткому, при збільшенні граничного потоку від  $3 \times 10^{-15}$  ерг/(с·см<sup>2</sup>) до  $3 \times 10^{-14}$  ерг/(с·см<sup>2</sup>).

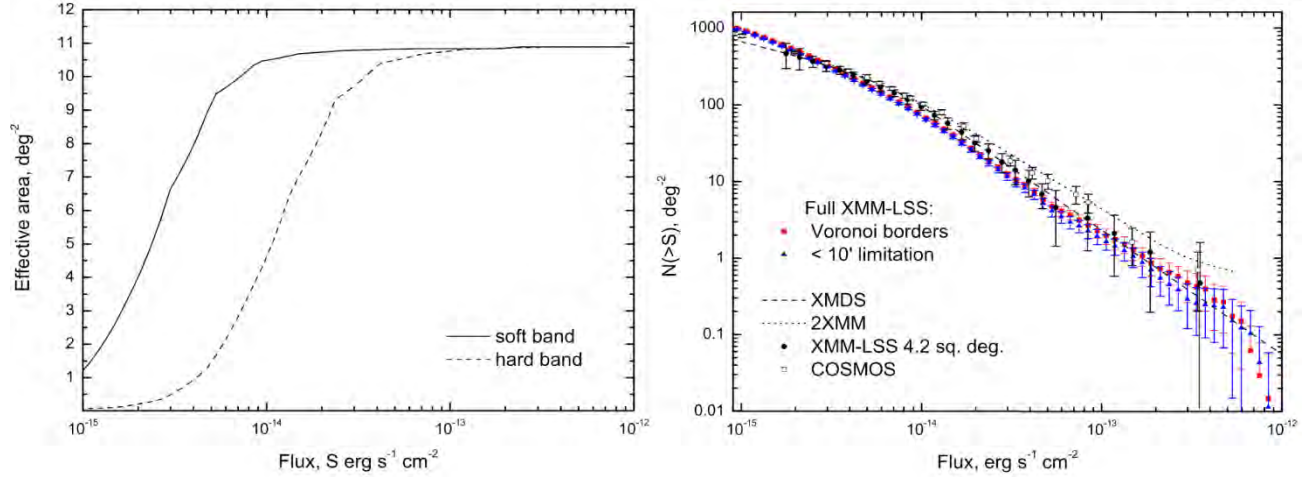


Рис. 8. Ефективна площа огляду XMM-LSS як функція потоку для джерел в м'якому та жорсткому рентгені (ліва панель).  $\log(N)\text{-}\log(S)$  співвідношення для джерел в м'якому рентгенівському діапазоні. Різними лініями зображені співвідношення для відомих оглядів: COSMOS, 2XMM, XMDS.

Згідно з уніфікованою моделлю квазару, різні типи АЯГ – затемненні (І типу з жорстким спектром в Х-діапазоні) та незатемненні (ІІ типу з м'яким спектром) – мають різні орієнтації відносно променя зору, тому їхні кореляційні властивості повинні бути схожі. Ми умовно розділи вибірку за ступенем жорсткості:  $HR = (CR_h - CR_s) / (CR_h + CR_s)$ , де  $CR$  – це потік в м'якому  $s$  діапазоні (0.5–2 кеВ) та  $h$  – в жорсткому (2–10 кеВ). АЯГ з  $HR > -0.2$  ми відносили до затемнених І типу. Було показано, що джерела з жорстким спектром більш кластеризовані, ніж ті, що мають м'який спектр (Рис. 9, ліва панель). Цей результат може говорити про те, що два основних типи АЯГ перебувають в різних середовищах, а саме АЯГ з м'яким рентгенівським спектром тяжіють до більш розріджених областей Всесвіту, якими є межі космічних воїдів.

За амплітудами кореляційних функцій було визначено фактор зсуву  $\sim 2.5$  для медіанного червоного зміщення 1.1 (при перетворенні у 3D) для м'якого діапазону та  $\sim 3.3$  для жорсткого діапазону при  $z = 1$ . Ці значення фактора зсуву відповідають масі материнського гало АЯГ  $M_h \sim 10^{13 \pm 0.3} h^{-1} M_\odot$  для м'якого діапазону і  $M_h \sim 10^{13.7 \pm 0.3} h^{-1} M_\odot$  для жорсткого.



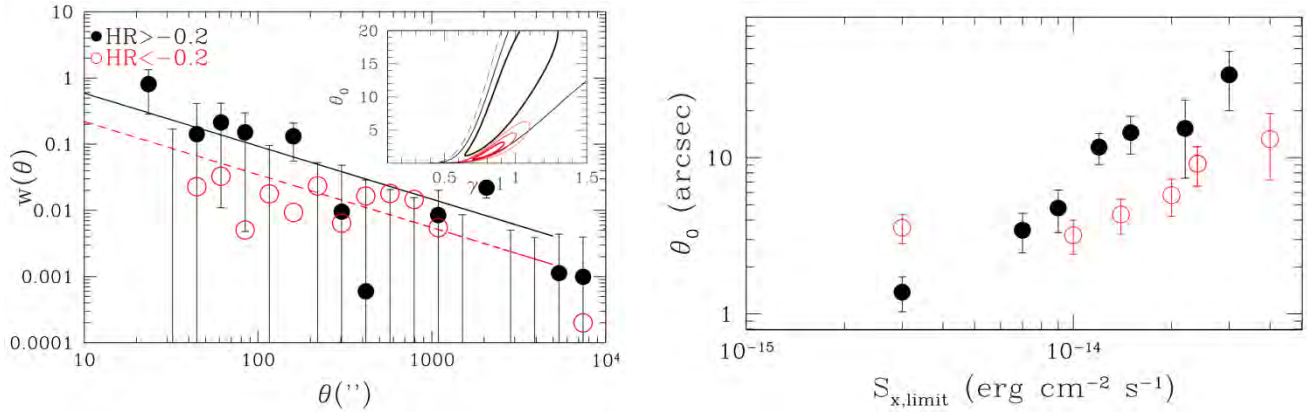


Рис. 9. Кутовий масштаб кореляції  $\theta_0$ , для АЯГ зі спектрами різних типів жорсткості (зліва), та в залежності від мінімального рентгенівського потоку для АЯГ спостережуваних в м'якому рентгенівському діапазоні (червоні кола), та в жорсткому (чорні кола). Залежність ступеня кластеризації зі збільшенням граничного мінімального потоку (справа).

**3.2 Вплив оточення на галактики та АЯГ.** Взаємозв'язок між еволюцією материнської галактики та формуванням центральної чорної діри вказує, що має бути залежність між фізичними властивостями АЯГ та оточенням галактики, цей зв'язок ще не до кінця зрозумілий. Який фактор, що впливає на властивості АЯГ є вирішальним – внутрішня еволюція чи вплив оточення? Чи впливає близьке і далеке оточення АЯГ/галактики на еволюцію чорної діри?

Для пошуку відповідей на ці питання у статтях [13, 33] було розглянуто близьке ( $< 0.4\text{--}1$  Мпк) та далеке ( $> 1$  Мрс) оточення АЯГ та рентгенівських галактик до  $z \sim 1$  у південному XXL полі (25 кв. град) та частині північного поля XXLXMM-LSS (11 кв. град), відповідно. Головною метою цих робіт було порівняння густини оточення різних типів рентгенівських точкових джерел, попередньо класифікувавши їх у рентгенівському, оптичному, інфрачервоному та радіо діапазонах спектру. У статті [33] було використано техніку знаходження фотометричних червоних зміщень для мультихвильових ототожнень рентгенівських об'єктів ( $\sim 50\%$  з 777). За відсутності червоних зміщень галактик поля, для знаходження надлишків густини біля АЯГ, використовувався оптичний каталог галактик CFHTLS [55]. Пошук надлишків густини проводився у проекції на небесну сферу (2D підхід) - у якості індикатора “сусіда” була застосована різниця видимих величин об'єктів з відповідними К-корекціями. В роботі [13] було також застосовано цей підхід для пошуку локальних надлишків густини, оскільки для галактик поля не існувало однорідного покриття червоних зміщень, але всі червоні зміщення для рент-

генівських об'єктів було визначено за спектральними спостереженнями. Пошук рентгенівських сусідів “далекого оточення” проводився тільки між об'єктами, що мають червоні зміщення.

Для того, щоб обчислити надлишок густини галактик біля кожного рентгенівського джерела, ми побудували навколо кожного об'єкту концентричні кола. Приймаючи до уваги відстань до джерела та кутову відстань  $D_A$ , було оцінено лінійні розміри кіл на відстань в супутній (rest-frame) системі координат. Ми порахували число  $N_i$  CFHTLS галактик всередині даного концентричного кола у діапазоні зоряних величин від  $m^*$  до  $m^*+1$  (далі – тьмяніше оточення) або від  $m^*-1$  до  $m^*$  (далі – яскравіше оточення), де  $m^*$  видима зоряна величина, що відповідає злому функції світності  $F(L)$  у  $i$ -смузі та розраховується за формулою:  $m^*=5\log(dL) + 25 + M_i^* + Q(0.1(z)) + K(0.1(z))$ , де  $M_i^* = -20.82 + 5\log(h)$  – абсолютна зоряна величина злому  $F(L)$  у  $i$ -смузі,  $Q(z)$  та  $K(z)$  – еволюційна та  $K$ -поправки, відповідно, зміщені до  $z=0.1$ , а  $dL$  – відстань за світністю. Ми визначали надлишок густини,  $\delta_i$ , усередині кожного концентричного кола як:  $\delta_i = N_i / (f_i \cdot N_b) - 1$ , де  $N_i$  – це загальне число об'єктів усередині  $i$ -ого концентричного кола з поверхневою площею  $A_i$ , а  $N_b$  – кількість галактик фону, що оцінювався у концентричному колі між 3.1 та 5 Мпк від джерела і яке має поверхневу площу  $A_b$ ;  $f_i$  – це нормуючий фактор, що нормалізує кількість галактик фону до площі кожного концентричного кола:  $f_i = A_i / A_b$ . Таким чином, для кожного рентгенівського джерела ми отримали кумулятивний надлишок густини  $F(>\delta) = N(>\delta) / N_{tot}$ , який визначався як процент джерел  $N_{tot}$ , що мали надлишок густини більше, ніж величина надлишку  $\delta$ .

У такий спосіб ми порахували надлишки густини для всіх вибірок: галактики та АЯГ, АЯГ 1 типу та АЯГ другого типу, світні і тьмяні АЯГ, радіо світні і радіо тьмяні у двох типів оточення – світне і тьмяне. На рис. 10 показано приклад порівняння надлишку густини для реальних вибірок АЯГ 1 та 2 типів ( $AGN_{soft}$  vs  $AGN_{hard}$ ) у яскравішому оточенні (ліва панель) і в тьмянішому оточенні (права панель) з рандомізованим каталогом. Для оцінки різниці між реальними та випадковими розподілами надлишків густини для кожного радіального біна було застосовано статистичний тест Колмогорова-Смірнова.

Ми досліджували властивості, близьке ( $< 0.4-1$  Мpc) та далеке ( $> 1$  Мpc) оточення АЯГ у XMM-LSS полі та південному полі XXL до  $z = 1$ . Результати отримані для двох полів свідчать, що АЯГ обох типів можуть знаходитися як у тісному, так у розрідженому оточенні. Однак, зі значимістю  $\sim 3\sigma$ , для поля XMM-LSS було знайдено, що значна частина АЯГ 2 типу знаходяться у більш населеному оточенні, ніж АЯГ першого типу. Далеке оточення ми шукали, порівнюючи відстані між парами АЯГ різних типів, а близьке оточення ми шукали серед оптичних галактик у проекції на небесну сферу. Було знайдено, що рентгенівські АЯГ, що мають також радіо ототожнення, є більш затьмареними (жорсткими у рентгенівському), ніж джерела, що не випромінюють в радіо діапазоні. Ніякої значної різниці у велико-



масштабному оточенні різних типів АЯГ (1 та 2 типів, радіо і не радіо об'єктами, світними і тм'яними) знайдено не було. Однак, було підтверджено, що АЯГ здебільшого розташовані у локальних надлишках густини, порівняно з рентгенівськими галактиками. Такі результати підтверджують уніфіковану схему АЯГ, але не виключають, що оточення може мати вплив на еволюцію АЯГ, оскільки дослідження найближчого оточення є проблематичним.

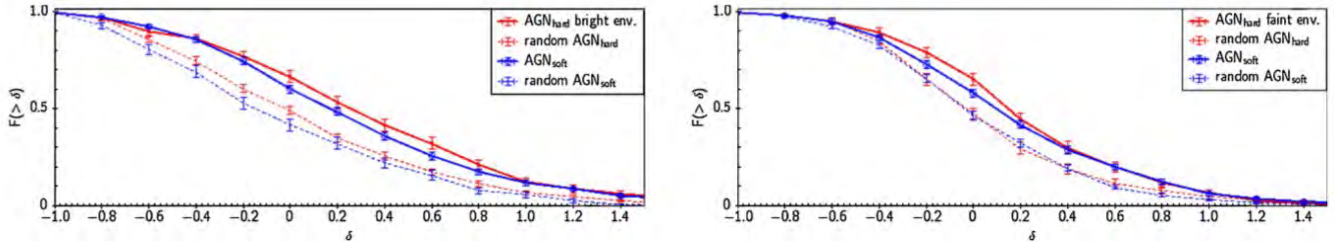


Рис. 10. Порівняння надлишку густини для реальних вибірок АЯГ 1 та 2 типів ( $AGN_{\text{soft}}$  vs  $AGN_{\text{hard}}$ ) у яскравішому оточенні (зліва) і в тьмянішому оточенні (справа) з рандомізованим каталогом.

Використовуючи ієрархічний метод кластеризації, було знайдено агломерати АЯГ  $> 2$  членів. Ці агломерати ми скорелювали з позиціями рентгенівських скупчень галактик. Було продемонстровано, що більшість цих концентрацій розташовані у безпосередній близькості до скупчень  $< 25\text{--}45$  Мпк. Ці результати можна інтерпретувати так, що рентгенівські АЯГ здебільшого розташовані у філаментах суперкластерів, але вони також можуть бути знайдені в оточенні з великою та малою густиною населення.

**3.3. Пошук гравітаційно - лінзових систем.** Гравітаційне лінзування залишається потужним інструментом для вивчення розподілу темної матерії у Всесвіті. Статистика гравітаційних лінз має забезпечити обмеження на космологічні параметри, оскільки оптична глибина лінзування залежить від величини об'єму простору між квазаром і спостерігачем. Детальні дослідження гравітаційно-лінзових систем, у свою чергу, дають змогу вивчити структуру джерела світла (наприклад, квазара) та розподілу маси в самій лінзі (галактики чи скупчення). В роботах [9, 10 та 27–29] була проведена обробка довготривалих спостережень гравітаційно-лінзованих квазарів для знаходження характеристик мікро-лінзування.

Оскільки рентгенівські точкові джерела можна спостерігати до великих червоних зміщень, ми вважали за доцільне оцінити кількість гравітаційних лінз в полі XXL огляду [8] та провести пошук кандидатів в лінзи серед оптичних ототожнень цих об'єктів [11]. Такий підхід виглядав досить оптимістично, тому що ймовірність того, що рентгенівське точкове джерело є АЯГ або квазаром є досить високою.

Отже, в роботі [8] ми оцінили частоту множинних зображень АЯГ серед оптичних ототожнень рентгенівських точкових джерел огляду XXL. Було отримано очікувані статистичні властивості цієї вибірки, такі як розподіл червоних зміщення лінзових джерел і дефлекторів, які призводять до утворення кількох зображень. Моделювання дефлекторів було проведено з використанням як сферичних, так і еліпсоїдних сингулярних ізотермічних розподілів мас. Було розраховано очікувані статистичні властивості для виявлення оптичних ототожнень множинних зображень квазарів з рентгенівського огляду XXL. Моделювання профілів мас лінзуючих об'єктів було проведено з моделями SIS (сферичний розподіл маси за законом  $r^{-2}$ ) та SIE (одиначний ізотермічний еліпсоїд). Серед рентгенівських об'єктів в діапазоні [0.5–2] кеВ з потоком більше ніж  $3.0 \times 10^{-15}$  ерг см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup> та оптичними ототожнення яскравіше за  $r = 25^m$  очікується  $\sim 20$  гравітаційно-лінзових квазарів з більше ніж двома зображеннями.

Мета роботи [11] полягала в тому, щоб визначити кандидатів у гравітаційні лінзи серед приблизно 5500 оптичних ототожнень рентгенівських точкових джерел XMM-LSS поля після візуального перегляду зображень CFHTLST006 та перевірки показників кольору кандидатів на колор-колор діаграмах. Такий підхід дозволив виділити 18 кандидатів в гравітаційні лінзи з видимою величиною  $r < 22.5^m$ . Додаткові тести на колір-колір діаграмах залишили у вибірці 3 найкращі кандидати у гравітаційні лінзи: J021511.4–034306, J022234.3–031616 і J022607.0–040301 – пари точкових джерел яких мають подібні кольори. Було використано фотометричну апроксимацію кратних зображень за допомогою відомої функції розсіювання точки. Спостереження цих кандидатів з вищою кутовою роздільною здатністю є перспективним в рамках виявлення там ефекту сильного гравітаційного лінзування.

**Розділ 4. Високоенергетичні процеси у войдах.** Величина та походження магнітного поля у войдах є важливими для розуміння еволюції Всесвіту [61, 62]. До недавнього часу войди розглядали як абсолютно порожні регіони великомасштабної структури Всесвіту. Такі регіони утворюються як наслідок початкової флуктуації поля густини матерії в місцях з густиною значно меншою за середню. Спектроскопічні спостереження та чисельні моделювання розвитку Всесвіту показують, що войди мають складну форму від сфер, еліпсоїдів, опуклих многогранників до складної піноподібної фрактальної структури. На околицях войдів розміщені так звані стіни, їхні розміри коливаються від кількох до сотень Мпк [63, 64, 65]. Малочисельні, як правило карликові галактики у войдах еволюціонують повільно і не відзначаються особливою активністю.

Існують два сценарії походження магнітного поля у войдах. Перший включає астрофізичні процеси руху плазми та утворення магнітного поля у відносно локальній області. Зореутворення в малочисельних галактиках войдів викликає певний потік космічних променів від спалахів наднових, прискорення космічних променів в оболонках залишків наднових. Динамо механізм цих космічних променів

призводить до посилення галактичного магнітного поля. Галактичний вітер підсилений космічними променями може досягати високих швидкостей, покидати галактичне гало та проникати відповідно у міжгалактичний простір космічної порожнини. Разом з космічними променями переноситься енергія магнітного поля в об'єм войду. Чисельні моделювання показують, що такий механізм може підтримувати індукцію магнітного поля у войдах аж до  $10^{-15}$  Гс із високим ступенем невизначеності, для порівняння магнітне поле в галактиках та скупченнях порядку  $10^{-6}$  Гс [62, 66].

Іншим кандидатом на механізм генерації магнітного поля у войдах є космологічні процеси генерації магнітних полів, що поширюються у ранньому Всесвіті. Таке магнітне поле при космологічному розширенні Всесвіту розчиняється у порожнинах і може слугувати зародковим для магнітного поля в галактиках і скупченнях галактик, якщо його напруженість є достатньо сильною. Сценарій первинного магнітного поля природно пояснює ієрархію магнітного поля в галактиках і войдах, тому що адіабатичне стиснення та динамо механізм можуть підсилювати магнітне поле в скупченнях та галактиках. Відповідно магнітне поле у войдах зменшується через їх космічне розширення [67].

Загальноприйнято, що чорні діри перебувають в центрі галактик, та генерують струмені заряджених частинок, які можуть транспортувати магнітне поле в міжгалактичне поле. У випадку надмасивної чорної діри в радіогалактиках таке транспортування може відбуватися на відстані кількох Мпк. Проти малі маси галактик та відсутність помітної активності АЯГ у войдах роблять такий сценарій малоймовірним. Проте карликові галактики можуть містити чорні діри проміжних мас, де присутність струменів на масштабі парсек або кілопарсек можуть мати місце. На додаток високо магнетизовані струмені АЯГ на границях порожнин в можуть проникати в основний об'єм та робити свій внесок у магнетизацію [68].

Різні моделі передбачають дуже різні величини магнітних полів у войдах від  $\leq 10^{-20}$  Гс аж до  $\approx 10^{-9}$  Гс. Спостережувана границя на магнітні поля у войдах на сьогоднішній день  $< 10^{-9}$  Гс впливає зі спостережень ефекту Фарадея для емісійних ліній від далеких квазарів. Подібне обмеження накладається зі спостереження мікрохвильового фону.

**4.1. Електромагнітні лавини від блазарів та вимірювання магнітного поля в войдах.** В роботі [6] проаналізована можливість вимірювання магнітного поля у войдах, виходячи зі спостережень вторинного випромінювання від електромагнітних лавин, що проходять крізь них. Розглянуто поширення в космічних войдах електромагнітних каскадів, викликаних високоенергетичними гамма-променями від малочисельного підкласу АЯГ — блазарів. Особливістю блазарів є спрямований майже на спостерігача релятивістський джет, який генерує в космічний простір високоенергетичні 10 – 300 ТеВ гамма-промені. Ті, в свою чергу, взаємодіють із інфрачервоним фоном і розпадаються на заряджені електрон-протонні пари, які

відхиляються в міжгалактичному магнітному полі та взаємодіють з мікрохвильовим фоном, генеруючи вторинні гамма-промені нижчих енергій (інверс-Комптон реакція). Вторинні гамма промені на енергіях 0.1–10 TeV можуть знову генерувати нові електрон-позитронні пари, або прямо спостерігатися черенковськими телескопами. Геометрія лавини зображена на Рис. 11.

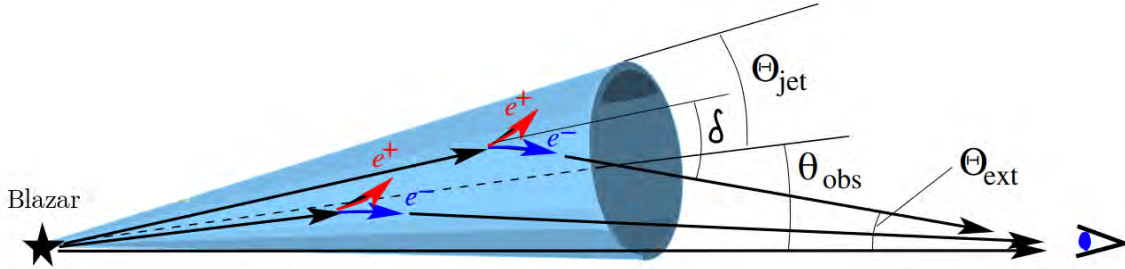


Рис. 11. Геометрія розвитку електромагнітної лавини в войді, ініційована гамма-фотоном.

Оскільки магнітне поле в скупченнях галактик та філаментах великомасштабної структури досить високе, тому електрон-позитронні пари там заплутуються, і вторинні гамма-промені ізотропно розсіюються. Саме в космічних войдах, де напруженість магнітного поля на порядки нижча, ніж у скупченнях, електромагнітна лавина розвивається вздовж напрямку руху первинного гамма-фотона та може бути виявлена зі спостережень по гало в гамма-діапазоні. Приблизні підрахунки для кутового розміру гало  $\Theta_{\text{ext}}$ :

$$\Theta_{\text{ext}} = \frac{D_{\gamma_0}}{D} \Delta \simeq \frac{0.7^\circ}{\tau(E_{\gamma_0}, z)} \left[ \frac{E_\gamma}{6 \text{ TeV}} \right]^{-1} \left[ \frac{B}{10^{-13} \text{ G}} \right],$$

де  $B$  – напруженість магнітного поля у войді,  $E_\gamma$  – енергія на якій спостерігається гало,  $\tau$  оптична глибина по відношенню до реакції утворення електрон-позитронних пар, що залежить від енергії первинного фотона  $E_{\gamma_0}$  та червоного зміщення блазару.

Інтегральний потік гало залежить від того яка частка об'єму на промені зору заповнена магнітним полем напруженості  $B$ , іншими словами від фактору заповненості  $\nu(B)$  войдами між блазаром та спостерігачем. З іншого боку на промені зору можуть лежати елементи великомасштабної структури, такі як скупчення та філаменти з магнітним полем на порядки вище ніж у войдах. Значне відхилення чи навіть заплутування електронів та позитронів в частинах лавини, яка проходить через великомасштабні структури, може спричинити пригнічення потоку вторинної лавини в напрямку на спостерігача на фактор  $\nu(B)^{1/3}$ .

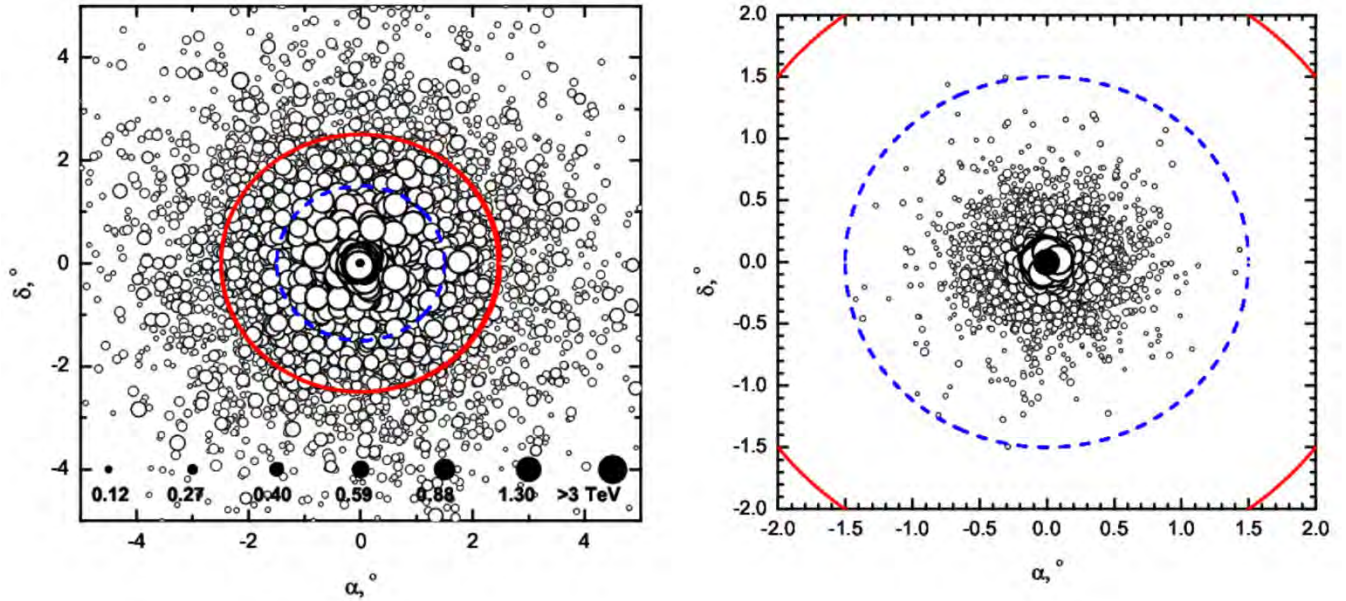


Рис. 12. Напрямки приходу первинних та вторинних гамма-фотонів від блазара на відстані 120 Мпк. Напруженість магнітного поля  $10^{-14}$  Гс (ліва панель) та  $10^{-15}$  Гс (права панель). Розмір фотонів репрезентує їхню енергію. Голуба переривчаста лінія радіусом 1.5 гр., відповідає полю зору черенковського телескопу MAGIC. Радіус червоного суцільного кола 2.5 гр. відповідає радіусу поля зору телескопа HESS.

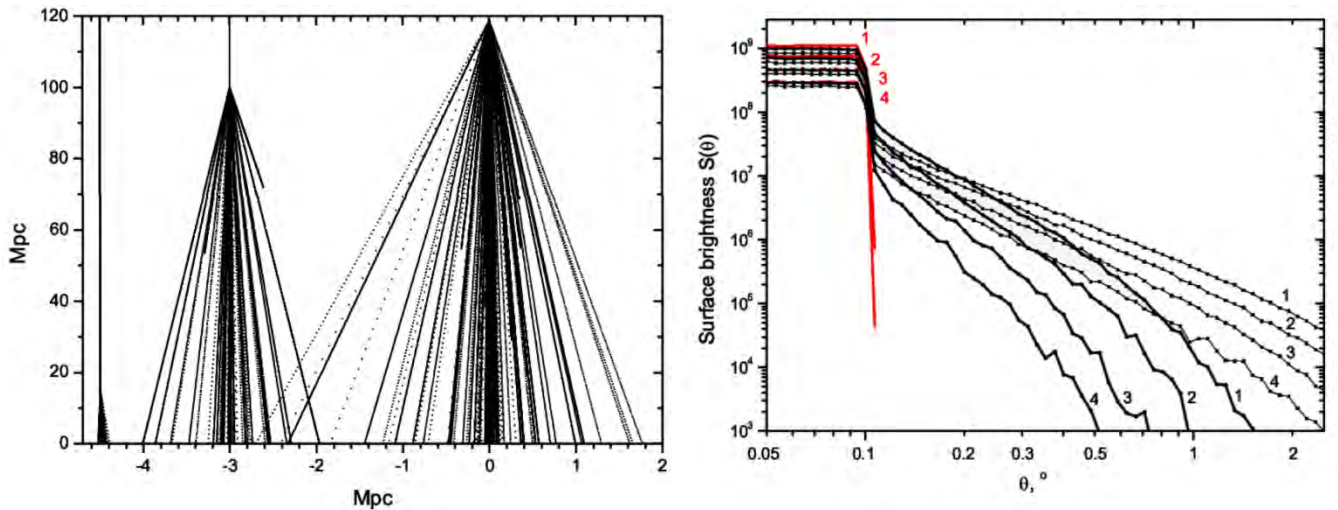


Рис. 13. Приклади лавин від гамма-фотонів різних енергій 10, 30, 100 TeV в магнітному полі войда напруженістю  $10^{-15}$  Гс (ліва панель). На правій панелі представлено профілі поверхневої яскравості в різних енергетичних смугах (1–0.11 TeV, 2–0.15 TeV, 3–0.22 TeV, 4–0.34 TeV) у магнітному полі войда напруженістю  $10^{-14}$  Гс (тонкі чорні лінії),  $10^{-15}$  Гс (товсті чорні лінії) та без магнітного поля (червоні лінії).



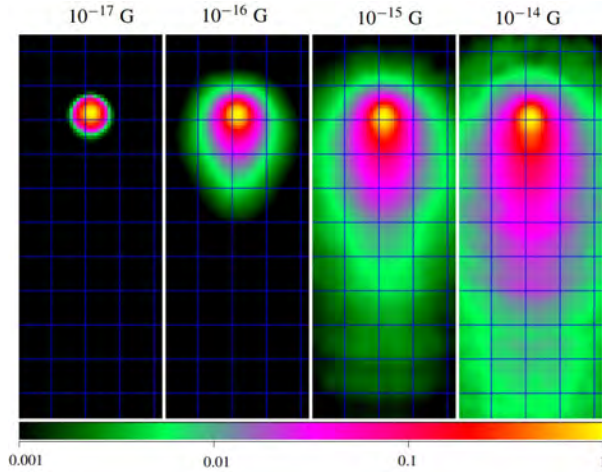


Рис. 14. Зображення гало блазара з чисельних моделювань на енергіях  $> 1$  GeV для різних індукцій магнітного поля в вийді, джет блазара нахилений на  $3^\circ$  до лінії променя зору [7].

Також у роботі зроблено оцінки параметрів черенковських телескопів, що зможуть зареєструвати магнітні поля різної величини:

$$B_{\max} \simeq 3 \times 10^{-13} \left[ \frac{\Theta_{\text{FoV}}}{1.5^\circ} \right] \left[ \frac{E_\gamma}{1 \text{ TeV}} \right] \left[ \frac{\tau(E_{\gamma_0}, z)}{10} \right] \text{ G}$$

$$B_{\min} \simeq 10^{-16} \left[ \frac{\tau(E_{\gamma_0}, z)}{1} \right] \left[ \frac{E_\gamma}{0.1 \text{ TeV}} \right] \left[ \frac{\theta_{\text{PSF}}}{0.1^\circ} \right] \text{ G}$$

де  $\Theta_{\text{FoV}}$  – розмір поля зору телескопа,  $\theta_{\text{PSF}}$  – розмір точкової функції розсіювання. Тобто, велика ефективна площа приймача і широке поля огляду необхідне для детектування сильного магнітного поля  $B \approx 10^{-12}$  Гс, оскільки має місце високий ступінь розсіяння вторинних фотонів та низька поверхнева яскравість гало. Висока чутливість на низьких енергіях гамма-діапазону ( $< 0.1$  TeV) та достатня кутова роздільна здатність є важливими для детектування слабого магнітного поля  $B \approx 10^{-16}$  Гс, оскільки в цьому випадку гало має компактний розмір.

Такі приблизні обрахунки дають якісну картину, але для їх верифікації необхідні чисельні моделювання. Отже було промодельовано лавину методом Монте-Карло на рівні індивідуальних частинок, використовуючи перерізи реакцій: взаємодії гамма фотонів високих енергій з інфрачервоними фотонами, утворення електропозитивних пар та інверс-Комптон реакції взаємодії електронів та позитронів з мікрохвильовим випромінюванням та генерації вторинних гамма-фотонів. Побудовано детальний профіль лавини, зображення протяжного гало навколо блазарів в гамма діапазоні для різних магнітних полів, для блазарів на різних відстанях від спостерігача (рис. 13).

Також було промодельовано зображення яке отримують черенковські телескопи MAGIC та HESS з різними полями зору від блазара на різних відстанях та для різних величин магнітного поля (Рис. 12). Таким чином, запропонований алгоритм у [6], випробуваний на чисельних даних, може бути використаний на реальних даних гамма-телескопів. Такі вимірювання дозволять вибрати коректну космологічну модель походження магнітного поля у Всесвіті, оскільки різні моделі дають дуже різні оцінки напруженості поля (більше ніж на 10 порядків).

Значний прогрес у розумінні явища блазарів було досягнуто з початком спостережень телескопа Фермі. Комбінування даних Фермі в енергетичній смузі 0.1–10 GeV і з даними наземних  $\gamma$ -телескопів, таких як HESS, MAGIC і VERITAS в діапазоні 100 GeV–10 TeV забезпечує вивчення детального спектру блазарів [60].  $\gamma$ -промені TeV-их енергій, що поглинаються на шляху від первинного джерела ініціюють електромагнітні каскади в міжгалактичному просторі. Електрон-позитронна компонента електромагнітного каскаду відхиляється позагалактичним магнітним полем.

У роботі [7] обговорюються спектральні, часові та морфологічні властивості релятивістських каскадів у джетах блазарів у діапазоні 0.1–1 GeV. Дослідження базується на двох незалежних чисельних моделюваннях індукованих  $\gamma$ -променями електромагнітних каскадів в міжгалактичний простір, введений у статтях [61] та [6]. За допомогою чисельних моделювань показано, що витягнута струменеподібна структура форми зображення зумовлена невеликим зміщенням (порядку кількох градусів) напрямку генерації первинних фотонів із блазара від променя зору. Досліджено характеристики протяжного зображення, а саме форму, розподіл поверхневої яскравості та їхню залежність від характеристик міжгалактичного магнітного поля (рис. 14). Показано, що гамма випромінювання від протяжної частини зображення затримується близько на 10 млн. років по відношенню до прямих фотонів від джерела. Така довга затримка означає, що протяжні гало навколо можуть спостерігатися навколо блазарів, які вже не активні.

**4.2. Властивості та стійкість електромагнітних лавин в войдах.** У роботі [4] проаналізована стабільність релятивістських пучків електрон-позитронних пар низької щільності, що утворюються у міжгалактичному середовищі від гамма-фотонів TeV-них енергій. Проблема актуальна для вимірювання магнітного поля в космічних порожнинах через спостереження в гамма діапазоні. Крім того, розсіювання таких пучків може істотно впливати на теплову історію войдів. Ми використали метод Монте-Карло для кількісної оцінки властивостей електро-магнітного потоку, зокрема зміну Лоренц-фактора і кутового розкиду пучка електрон-позитронних пар породжених потоків, залежно від відстані від самого блазара (рис. 15). Було показано, що комбінація кінетичних ефектів, нелінійного загасання Ландау та неоднорідностей густини середовища стабілізують електрон-позитронні пучки. Енергія пучка не витрачається на генерування нестабільностей в плазмі.

Тобто, пучок в космічних войдах є стабільний на масштабах набагато більших, ніж час розвитку електромагнітного каскаду. З цього також, випливає, що електрон-позитронні пучки від блазарів не впливають на міжгалактичне середовище.

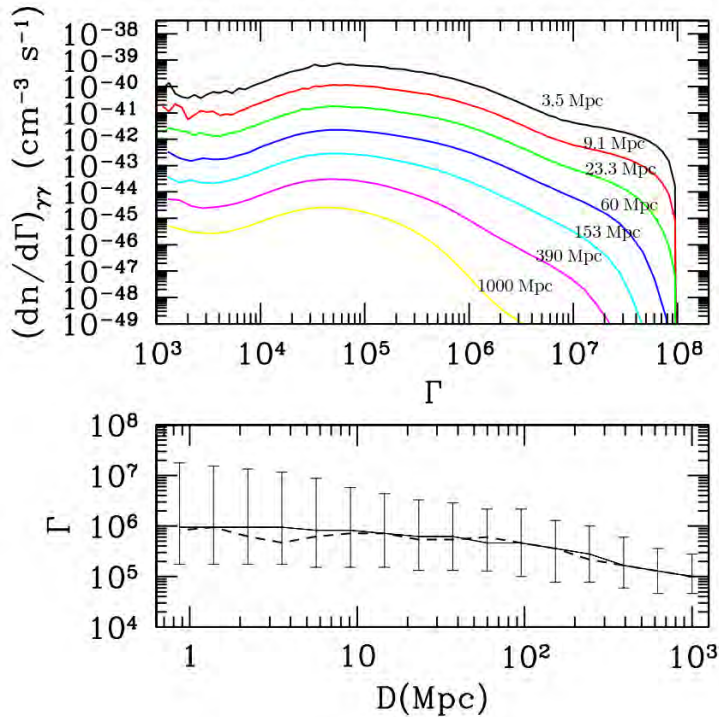


Рис. 15 Розподіл по енергії електро-позитронного пучка від блазару з еквівалентом ізотропної світності  $10^{45}$  ерг/с, на різних відстанях від блазару (верхня панель), середня енергія та розкид енергії (68%) частинок в пучку на різних відстанях (нижня панель).

У роботі [5] детально проаналізовано взаємодію первинних високо-енергетичних гамма-фотонів індукованих ТеВ-ними блазарами з оптичним та інфрачервоним фоновим ізотропним випромінюванням у космічних войдах. Фонові фотони мають енергії більш ніж на 10 порядків нижчі за взаємодіючий з ними фотон ТеВ-них енергій. Результати аналітичних розрахунків було перевірено чисельним моделюванням. Доведено, що кутовий розподіл генерованих електрон-позитронних пар від подвійної фотонної взаємодії в лабораторній системі відліку є сильно концентрованим в напрямку руху первинного гамма-фотону. Аналітично виведено рівняння для енергії електрон-позитронних пар для різних енергетичних спектрів як фонового випромінювання, так і первинного гамма-випромінювання. Отримані аналітичні вирази було перевірено на чисельних моделюваннях.



## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота присвячена дослідженню космічних войдів, або порожнин, – областей у Всесвіті з низькою концентрацією галактик, а також аналізу оточення і населення войдів та процесів, які відбуваються у войдах та навколо них у широкому спектральному діапазоні. Серед таких об'єктів великомасштабної структури Всесвіту – галактики, АЯГ, блазари, скупчення галактик. Серед інших досліджених важливих чинників – магнітне поле войдів, ефекти гравітаційного линзування на квазарах, методи визначення відстаней до галактик та виділення малонаселених систем галактик за різними критеріями ізольованості. Найважливіші отримані результати такі:

1. Було запропоновано два методи пошуку войдів, які базуються на динамічних критеріях виділення порожнеч в лагранжевих координатах: LZVF, що використовує наближення Лагранжа-Зельдовича для відстеження зворотних у часі орбіт галактик та UVF – використовує метод послаблення кореляційної функції галактика-галактика для доведення розподілу об'єктів до однорідного. В обох випадках порожнечі визначаються як області негативної дивергенції зміщень, які можна розглядати як стоки трейсерів маси. Значимість сигналу дивергенції в центральних частинах войдів отриманих з обидвох шукачів на 60% вища ніж для надлишку профіля густини, отриманим геометричним методом.

2. Показано, що запропоновані шукачі войдів є перспективними альтернативами до існуючих, і є ефективними для покращення точності космологічних тестів, що базуються на статистиці войдів та вимірюванні асиметричностей накладених войдів, наприклад, тесту Алькока-Пачинського для уточнення космічних параметрів, насамперед, густини матерії  $\Omega_m$ .

3. Було застосовано п'ять моделей машинного навчання для визначення модуля відстані галактик за їхніми спостережуваними даними, такими як видимі зоряні величини у кількох смугах, кутовий діаметр, поверхнева яскравість, показники кольору та координати галактик, променева швидкість, а також відомий модуль відстані. Було показано, що модель регресії нейронної мережі з двома прихованими шарами дає точніший результат, ніж інші моделі. Показано, що запропонована модель є конкурентоспроможною у порівнянні з загальноновживаними вторинними методами вимірювань модуля відстані, такими як метод фундаментальної площини (FP) та відношення Таллі-Фішера.

4. Було проведено аналіз двоточкової кореляційної функції вибірки точкових джерел поля XMM-LSS (11 кв. град) зі 94 спостережуваних полів XMM-Newton ( $d=30^\circ$ ), що містять понад п'ять тисяч точкових джерел у м'якому (0.5– 2 кеВ) та жорсткому (2–10 кеВ) діапазонах. Було знайдено, що амплітуда двоточкової кореляційної функції значно більша у жорсткому діапазоні, ніж у м'якому. Показано,

що АЯГ з жорстким рентгенівським спектром (здебільшого АЯГ 2 типу) більш кластеризовані, ніж ті, що мають м'який спектр (АЯГ 1 типу). Це може означати, що два основних типи АЯГ перебувають в різних середовищах, а саме АЯГ з м'яким рентгенівським спектром тяжіють до більш розріджених областей Всесвіту, якими є межі космічних войдів.

5. Дослідження властивостей близького ( $<0.4-1$  Мпк) та далекого ( $> 1$  Мпк) оточення рентгенівських АЯГ поля XXL до  $z = 1$  показало, що АЯГ обох типів можуть знаходитися як у тісному, так у розрідженому оточенні. Було знайдено, що рентгенівські АЯГ, що мають також радіо ототожнення є більш затьмареними (жорсткими у рентгені), ніж джерела, що не випромінюють в радіо діапазоні. Ніякої значної різниці в великомасштабному оточенні різних типів АЯГ (1 та 2 типів, радіо і не радіо об'єктами, світними і тм'яними) знайдено не було. Однак, було підтверджено, що АЯГ здебільшого розташовані у локальних надлишках густини, порівняно з рентгенівськими галактиками. Такі результати підтверджують універсальну схему АЯГ, але не виключають, що оточення може мати вплив на еволюцію АЯГ.

6. Було застосовано геометричний метод Вороного вищих порядків для виділення галактик, пар та триплетів з вибірки огляду SDSS. Було знайдено, що галактики в ізольованих парах та триплетах мають світність у два рази вищу, ніж ізольовані галактики. Також, групи галактик у більш тісному оточенні – наприклад, що знаходяться у скупченнях, мають більшу дисперсію швидкостей та відношення маси до світності.

7. Було розраховано очікувані статистичні властивості для виявлення оптичних ототожнень множинних зображень квазарів з рентгенівського огляду XXL, враховуючи параметри спостережень супутника. Серед 11 тисяч квазарів очікується знайти  $\sim 20$  гравітаційно-лінзових квазарів з більше ніж двома зображеннями. Візуальний перегляд оптичних  $g$ ,  $r$  та  $i$  зображень 5500 рентгенівських АЯГ, розташованих на 11 кв. градусах огляду XMM-LSS та аналіз кольорів об'єктів дозволив знайти 3 кандидати у лінзовані АЯГ.

8. Знайдено, що властивості електромагнітної лавини та зображення блазарів в гамма-променях сильно залежать від магнітного поля в космічних войдах через які поширюється лавина, та від частки об'єму Всесвіту, зайнятої войдами. Така залежність може бути використана для виявлення та оцінки екстремально малого магнітного поля в космічних порожнинах. Було вивчено морфологічні властивості гамма зображень блазарів методами чисельних моделювань. Досліджено характеристики протяжного зображення, а саме форму, розподіл поверхневої яскравості та їхню залежність від характеристик міжгалактичного магнітного поля. Показано, що гамма випромінювання від протяжної частини зображення затримується близько на 10 млн. років по відношенню до прямих фотонів від джерела. Така довга затримка означає, що протяжні гало навколо можуть спостерігатися навколо блазарів, які

вже не активні. Доведено, що електрон-позитронні пучки в космічних порожнинах є стабільними на масштабах набагато більших, ніж час розвитку електромагнітного каскаду. З цього випливає, що електрон-позитронні пучки від блазарів не впливають на міжгалактичне середовище.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

**Основні наукові праці (у реферованих журналах першого квартилю (Q1) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports), окрім статей з \* (Q3):**

1. Elyiv, A., Marulli, F., Pollina, G. et al., 2015. Cosmic voids detection without density measurements. *MNRAS*, 448, pp. 642–653.
2. Elyiv, A. A., Melnyk, O. V., Vavilova, I. B. et al., 2020. Machine-learning computation of distance modulus for local galaxies. *A&A*, 635A, 124E (7 pp.).
3. Elyiv, A., Clerc, N., Plionis, M. et al., 2012. Angular correlation functions of X-ray point-like sources in the full exposure XMM-LSS field. *A&A*, 537, id. A131 (14 pp.).
4. Miniati, F., Elyiv, A., 2012. Relaxation of Blazar-induced Pair Beams in Cosmic Voids. *ApJ*, 770, 1 (9 pp.).
5. Schlickeiser, R., Elyiv, A., Ibscher, D., Miniati, F., 2012. The pair beam production spectrum from photon-photon annihilation in cosmic voids. *ApJ*, 758, 101 (18 pp.).
6. Elyiv, A., Neronov, A., Semikoz, D.V., 2010. Gamma-ray induced cascades and magnetic fields in the intergalactic medium, *Phys. Rev. D.*, 80, 023010(11 pp.).
7. Neronov, A., Semikoz, D., Kachelriess, M., Ostapchenko, S., Elyiv, A., 2010. Degree- scale GeV "Jets" from Active and Dead TeV Blazars. *ApJ Journal Letters*, 719, pp. L130-L133.
8. Finet, F., Elyiv, A., Melnyk, O. et al., 2015. Predicted multiply imaged X-ray AGNs in the XXL survey. *MNRAS*, 452, pp. 1480-1492.
9. Ricci, D., Poels, J., Elyiv, A. et al., 2011. Flux and color variations of the quadruply imaged quasar HE 0435-1223. *A&A*, 528, id.A49, (16 pp.).
10. Ricci, D., Elyiv, A., Finet, F. et al., 2013. Flux and color variations of the doubly imaged quasar UM673. *A&A*, 551, id.A104 (7 pp.).
11. Elyiv, A., Melnyk, O., Finet, F. et al., 2013. Search for gravitational lens candidates in the XMM-LSS/CFHTLS common field. *MNRAS*, 434, pp. 3305–3309.
12. Elyiv, A., Melnyk, O., Vavilova, I., 2009. High-order 3D Voronoi tessellation for identifying isolated galaxy pairs and triplets. *MNRAS*, 394, pp. 1409 - 1418.
13. Melnyk, O., Elyiv, A., Smolčić, V. et al., 2018. The XXL Survey. XXI. The environment and clustering of X-ray AGN in the XXL-South field. *A&A*, 620, id.A6 (14 pp.).

**Наукові праці, які додатково висвітлюють тему дисертації:**

**а) Наукові праці у реферованих журналах першого квартилю (Q1) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports, окрім статті з \* (Q3) та \*\* (Q4):**

14. Nwaokoro, E., Phillipps, S., Young, A. J. ... Elyiv, A. et al., 2021. GAMA/XXL: X-ray point sources in low-luminosity galaxies in the GAMA G02/XXL-N field. *MNRAS*, 502, pp. 3101-3112.

15. Koulouridis, E., Ricci, M., Giles, P.... Elyiv, A. et al., 2018. The XXL Survey. XXXV. The role of cluster mass in AGN activity. *A&A*, 620, id.A20 (10 pp.).

16. Chiappetti, L., Fotopoulou, S., Lidman, C. ... Elyiv, A. et al., 2018. The XXL Survey: XXVII. The 3XLSS point source catalogue, *A&A*, 620, A12 (18 pp.).

17. Guglielmo, V., Poggianti, B. M., Vulcani, B. ... Elyiv, A. et al., 2018. The XXL Survey: XXX. Characterisation of the XLSSsC N01 supercluster and analysis of the galaxy stellar populations. *A&A*, 620, id. A15 (15 pp.).

18. Guglielmo, V., Poggianti, B. M., Vulcani, B. ... Elyiv A. et al., 2018. The XXL Survey: XXII. The XXL-North spectrophotometric sample and galaxy stellar mass function in X-ray detected groups and cluster. *A&A*, 620, id.A7 (20 pp.).

19. Pierre, M., Adami, C., Birkinshaw, M. ... Elyiv, A. et al., 2017. The XXL survey: First results and future, *Astronomische Nachrichten*, 338, pp. 334-341.

20. Lavoie, S., Willis, J. P., Démoclès, J. ... Elyiv, A. et al., 2016. The XXL survey XV: evidence for dry merger driven BCG growth in XXL-100-GC X-ray clusters. *MNRAS*, 2016, 462, pp. 4141–4156.

21. Koulouridis, E., Poggianti, B., Altieri, B. ... Elyiv, A. et al., 2016. The XXL Survey. XII. Optical spectroscopy of X-ray-selected clusters and the frequency of AGN in superclusters. *A&A*, 592, id. A11 (11 pp.).

22. Fotopoulou, S., Pacaud, F., Paltani, S. ... Elyiv, A. et al., 2016. The XXL Survey. VI. The 1000 brightest X-ray point sources. *A&A*, id.A5 (30 pp.).

23. Pierre, M., Pacaud, F., Adami, C. ... Elyiv, A. et al., 2016. The XXL Survey. I. Scientific motivations – XMM-Newton observing plan – Follow-up observations and simulation program. *A&A*, 592, id.A1 (16 pp.).

24. Lidman, C., Ardila, F., Owers, M. ... Elyiv, A. et al., 2016. The XXL Survey XIV. AA $\Omega$  Redshifts for the Southern XXL Field, *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 33, e001 (7 pp.).

25. Koulouridis, E., Plionis, M., Melnyk, O., Elyiv, A. et al., 2014. X-ray AGN in the XMM-LSS galaxy clusters: no evidence of AGN suppression. *A&A*, 567, id. A83 (15 pp.).

26. Chiappetti, L., Clerc, N., Pacaud, F. ... Elyiv, A. et al., 2013. The XMM-Large Scale Structure catalogue - II. X-ray sources and associated multiwavelength data. *MNRAS*, 429, pp. 1652–1673.
27. Finet, F., Elyiv, A., & Surdej, J., 2012. Detection of bright imaged quasar with Gaia. *Memorie della Societa Astronomica Italiana*. 83, pp. 944-988. \*\*
28. Akhunov, T. A., Wertz, O., Elyiv, A. et al., 2017. Adaptive PSF fitting - a highly performing photometric method and light curves of the GLS H1413+117: time delays and micro-lensing effects, *MNRAS*, 465, pp. 3607–3621.
29. Giannini, E., Schmidt, R. W., Wambsganss, J. .. Elyiv, A. et al., 2017. MiND-STEP differential photometry of the gravitationally lensed quasars WFI 2033-4723 and HE 0047-1756: microlensing and a new time delay, *A&A*, 597, 16.
30. Vavilova I.B., Dobrycheva D.V., Vasylenko M.Yu., Elyiv A.A. et al., 2021. Machine learning technique for morphological classification of galaxies from the SDSS I. Photometry-based approach, *A&A*, 648, A122 (14 pp.).
31. Vavilova I.B., Khramtsov V., Dobrycheva D.V., Vasylenko M.Yu., Elyiv A.A., Melnyk O.V., 2022. Machine learning technique for morphological classification of galaxies from SDSS. II. The image-based morphological catalogs of galaxies at  $0.02 < z < 0.1$ , *Space Science & Technology*, 28(1), pp. 03–22.
32. Dobrycheva D.V., Melnyk O.V., Vavilova I.B., Elyiv A.A., 2015. Environmental Density vs. Colour Indices of the Low Redshifts Galaxies, *Astrophysics*, 58, pp. 168–180.
33. Melnyk, O., Plionis, M., Elyiv, A. et al., 2013. Classification and environmental properties of X-ray selected point-like sources in the XMM-LSS field. *A&A*, 557, id. A81 (14 pp.)

### **б) Розділи у монографіях**

34. Elyiv A.A., Melnyk O.V., Vavilova I.B., 2015. Dark and baryonic matter distribution in the sparsely populated galaxy groups. In: Vavilova I.B., Bolotin Yu.L., Boyarsky A.M. et al. *Dark matter: Observational manifestation and experimental searches*. Kyiv: Akadempriodyka, 2015, 375 p., Vol. 3 of the “Dark energy and dark matter in the Universe”, in three volumes, Ed. V. Shulga. p.129–158.
35. Vavilova I., Elyiv A., Dobrycheva D., Melnyk O., 2021. The Voronoi Tessellation Method in Astronomy. In: Zelinka I., Brescia M., Baron D. (eds). *Intelligent Astrophysics. Emergence, Complexity and Computation*, vol 39. Springer, Cham. p. 57–79.
36. Vavilova I., Dobrycheva D., Vasylenko M., Elyiv A., Melnyk O. *Multi-wavelength Extragalactic Surveys: Examples of Data Mining Knowledge Discovery in Big Data from Astronomy and Earth Observation*, 1st Edition. Edited by Petr Skoda and Fathallahman Adam. Elsevier, 2020, p. 307–323.
37. Vavilova I., Pakuliak L., Babyk I., Elyiv A. et al., 2020. *Surveys, Catalogues, Databases, and Archives of Astronomical Data Knowledge Discovery in Big Data from As-*

tronomy and Earth Observation, 1st Edition. Edited by Petr Skoda and Fathalrahman Adam. Elsevier, 2020, p. 57–102.

### **в) Матеріали і тези конференцій**

38. Vavilova I.B., Elyiv A.A., Dobrycheva D.V., Melnyk O.V. Voronoi tessellation in a spatial galaxy distribution. Abstracts of the Institute of Mathematics Conferences, Sixth International Conference on Analytic Number Theory and Spatial Tessellations, 24-28 Sept., 2018, Kyiv, Ukraine. P. 68.

39. Dobrycheva D., Melnyk O., Elyiv A., Vavilova I. Environmental density of galaxies from SDSS via Voronoi tessellation The Zeldovich Universe: Genesis and Growth of the Cosmic Web, Proceedings of the International Astronomical Union, Cambridge: Cambridge University Press, 2016, Vol. 308, pp. 248–249.

40. Elyiv A. X-ray surveys - Correlation function analyses of X-ray point-like sources in the XMM-LSS and XXL fields Half a Century of X-ray Astronomy, Proceedings of the conference held 17-21 September, 2012 in Mykonos Island, Greece. Online at <http://www.astro.noa.gr/xcosmo/>, id.107.

41. Dobrycheva D.V., Melnyk O.V., Vavilova I.B., Elyiv A.A. Environmental properties of galaxies at  $z < 0.1$  from the SDSS via the Voronoi tessellation. Odessa Astronomical Publications, 2014, 27, no 1, p. 26–27.

42. Melnyk O.V., Elyiv A.A., Vavilova I.B. 3-D Voronoi's Tessellation as a Tool for Identifying Galaxy Groups. In: Galaxy Evolution Across the Hubble Time, Edited by F.Combes and J. Palous, Proceedings of the International Astronomical Union, Cambridge: Cambridge University Press, 2007, Vol. 235, p. 223.

43. Melnyk O., Elyiv A. Clustering and environmental studies of AGN in the XMM - LSS and XXL fields. Абстракти “Астрономія та фізика космосу в Київському університеті”, Міжнар. конференція в рамках VIII Всеукраїнського фестивалю науки, 27-30 травня 2014 року, Київ. с.29.

44. Dobrycheva D., Vavilova I., Elyiv A., Melnyk O. Scaling properties of new sample of galaxies with  $z < 0.1$  from SDSS DR9. Абстракти “Астрономія та фізика космосу в Київському університеті”, Міжнар. конференція в рамках VIII Всеукраїнського фестивалю науки, 27-30 травня 2014 року, Київ. с.18.

### **СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

45. Alcock, C., Paczynski, B., 1979. An evolution free test for non-zero cosmological constant. Nature, 281, pp. 358–359.

46. Nadathur, S., Hotchkiss, S., Diego, J. M. et al., 2015. Self-similarity and universality of void density profiles in simulation and SDSS data. MNRAS, 449, pp. 3997–4009.

47. Neyrinck, M. C. 2008, ZOBOV: a parameter-free void-finding algorithm. *MNRAS*, 386, pp. 2101–2109.
48. Riess, A. G., Fliri, J., & Valls-Gabaud, D., 2012. Cepheid Period-Luminosity Relations in the Near-infrared and the Distance to M31 from the Hubble Space Telescope Wide Field Camera 3. *ApJ*, 745, pp. 156-162.
49. Steer, I., Madore, B.F., & Mazzarella, J.M. et al., 2017. Redshift-independent Distances in the NASA/IPAC Extragalactic Database: Methodology, Content, and Use of NED-D. *AJ*, 153, pp. 37-57.
50. Makarov, D., Prugniel, P., Terekhova, N. et al., 2014. HyperLEDA. III. The catalogue of extragalactic distances. *A&A*, 570, id.A13 (12 pp.)
51. Antonucci, R., 1993. Unified models for active galactic nuclei and quasars. *Annual Rev. Astron. Astrophys.*, 31, pp. 473-521.
52. Miyaji, T., Hasinger, G., Schmidt, M., 1999. Evolution of the ROSAT AGN Luminosity Function. Highlights in X-ray astronomy. Symposium proceedings. Eds. B. Aschenbach & M. J. Freyberg. Garching : Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, 1999. (MPE report, No. 272, ISSN 0178-0719), p.222.
53. Bongiorno, A., Merloni, A., Brusa, M. et al., 2012. Accreting supermassive black holes in the COSMOS field and the connection to their host galaxies. *MNRAS*, 427, pp. 3103–3133.
54. Wolf J., Nandra, K., Salvato, M. et al., 2021. First constraints on the AGN X-ray luminosity function at  $z \sim 6$  from an eROSITA-detected quasar. *A&A*, 647, id.A5, (16 pp.).
55. Cuillandre, J.-C. J., Withington, K., Hudelot, P. et al., 2012. Introduction to the CFHT Legacy Survey final release (CFHTLS T0007). *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems IV. Proceedings of the SPIE*, 8448, article id. 84480M, (6 pp.).
56. Voronoi G.F., 1908. Nouvelles applications des paramètres continus à la théorie de formes quadratiques. *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, 134, pp. 198-287.
57. Icke, V., Weygaert, R., 1987. Fragmenting the universe. *A&A*, 184, pp. 16-32.
58. Coles, P., Barrow, J. D., 1990. Microwave background constraints on the Voronoi model of large-scale structure. *MNRAS*, 244, pp. 557-562.
59. Melnyk, O.V., Elyiv A. A., Vavilova I.B., 2006. The structure of the Local Supercluster of galaxies detected by three-dimensional Voronoi's tessellation method. *Kinematika i Fizika Nebesnykh Tel*, 22, no. 4, pp. 283-296.
60. Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M. et al, 2009. Fermi Observations of TeV-Selected Active Galactic Nuclei. *Astrophys. J.*, 707, pp. 1310-1333.
61. DeLavallaz, A., Fairbairn, M., 2012. Voids as Alternatives to Dark Energy and the Propagation of  $\gamma$  Rays through the Universe. *Physical Review Letters*, 108, id. 171301, (4 pp.).

62. Beck, A. M., Hanasz, M., Lesch, H. et al., 2013. On the magnetic fields in voids. MNRAS, 429, pp. L60-L64.
63. Joeveer, M., Einasto, J., & Tago, E., 1978. Spatial distribution of galaxies and of clusters of galaxies in the southern galactic hemisphere. MNRAS, 185, pp. 357-370.
64. Huchra, J. P., Geller, M. J., de Lapparent, V., Burg, R. 1988, The CFA Redshift Survey. Large Scale Structures of the Universe, Proceedings of the IAU. Eds J. Audouze, M.-C. Pelletan and A. Szalay. Vol. 130, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p.105.
65. Geller M.J., Huchra J.P., 1989. Mapping the Universe. Science, 246, pp. 897-903.
66. Geng, A., Kotarba, H., Burzle, F. et al., 2012. Magnetic field amplification and X-ray emission in galaxy minor mergers. MNRAS, 419, pp. 3571-3589.
67. Kahnashvili, T., Maravin, Y., Natarajan, A. et al., 2013. Constraining Primordial Magnetic Fields through Large-scale Structure. ApJ, 770, id. 47, (7 pp.).
68. Bertone, S., Vogt, C., Enßlin, T., 2006. Magnetic field seeding by galactic winds. MNRAS, 370, pp. 319-330.

## АНОТАЦІЯ

**Елиїв А. А. Космічні войди: структура і фізичні процеси в них та навколо.** – Кваліфікаційна наукова праця у формі наукової доповіді.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.03.02 – Астрофізика. Радіоастрономія (104 – Фізика та астрономія). – Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України, Київ, 2021.

Робота присвячена дослідженню космічних войдів, або порожнин - областей у Всесвіті з низькою концентрацією галактик. Застосовано кілька методів виділення войдів та розглянуто населення космічних порожнин. Досліджено населення галактик, що оточує войди і скупчення. Визначено відстані до галактик Місцевого Всесвіту методами машинного навчання. Застосовано методи кореляційної функції та пошуку надлишків густини для вивчення оточення різних типів активних ядер галактик (АЯГ), відібраних у рентгенівському діапазоні. Застосовано метод мозаїки Вороного другого та третього порядків для виокремлення пар і триплетів галактик та проаналізовано їхні властивості з точки зору ізольованості системи. Проведено пошук гравітаційно-лінзованих систем квазарів у рентгенівському полі. Проаналізована можливість вимірювання магнітного поля у войдах, виходячи зі спостережень вторинного випромінювання від електромагнітних лавин, що проходять крізь них.



Було запропоновано два методи пошуку войдів, які базуються на динамічних критеріях виділення порожнеч в лагранжевих координатах: LZVF, що використовує наближення Лагранжа-Зельдовича для відстеження зворотних у часі орбіт галактик та UVF - використовує метод послаблення кореляційної функції галактика-галактика для доведення розподілу об'єктів до однорідного. В обох випадках порожнечі визначаються як області негативної дивергенції зміщень, які можна розглядати як стоки трейсерів маси. Значимість сигналу дивергенції в центральних частинах войдів отриманих з обидвох шукачів на 60% вища ніж для надлишку профіля густини, отриманим геометричним методом.

Показано, що запропоновані шукачі войдів є перспективними альтернативами до існуючих, і є ефективними для покращення точності космологічних тестів, що базуються на статистиці войдів та вимірюванні асиметричностей накладених войдів, наприклад, тесту Алькока-Пачинського для уточнення космічних параметрів, насамперед  $\Omega_m$ .

Було застосовано п'ять моделей машинного навчання для визначення модуля відстані галактик за їхніми спостережуваними даними, такими як видимі зоряні величини у кількох смугах, кутовий діаметр, поверхнева яскравість, показники кольору та координати галактик, променева швидкість, а також відомий модуль відстані. Було показано, що модель регресії нейронної мережі з двома прихованими шарами дає точніший результат, ніж інші моделі. Показано, що запропонована модель є конкурентоспроможною у порівнянні з загальнозживаними вторинними методами вимірювань модуля відстані, такими як метод фундаментальної площини (FP) та відношення Таллі-Фішера.

Було проведено аналіз двоточкової кореляційної функції вибірки точкових рентгенівських джерел поля XMM-LSS (11 кв. град) зі 94 спостережуваних полів XMM-Newton ( $d=30'$ ), що містять понад п'ять тисяч точкових джерел у м'якому (0.5– 2 keV) та жорсткому (2–10 keV) діапазонах. Було знайдено, що амплітуда двоточкової кореляційної функції значно більша у жорсткому діапазоні, ніж у м'якому. Показано, що АЯГ з жорстким рентгенівським спектром (здебільшого АЯГ 2 типу) більш кластеризовані, ніж ті, що мають м'який спектр (АЯГ 1 типу). Це може означати, що два основних типи АЯГ перебувають в різних середовищах, а саме АЯГ з м'яким рентгенівським спектром тяжіють до більш розріджених областей Всесвіту, якими є межі космічних войдів.

Дослідження властивостей близького ( $<0.4-1$  Mpc) та далекого ( $> 1$  Mpc) оточення рентгенівських АЯГ поля XXL до  $z = 1$  показало, що АЯГ обох типів можуть знаходитися як у тісному, так у розрідженому оточенні. Було знайдено, що рентгенівські АЯГ, що мають також радіо ототожнення є більш затьмареними (жорсткими у рентгенівському), ніж джерела, що не випромінюють в радіо діапазоні. Ніякої значної різниці в великомасштабному оточенні різних типів АЯГ (1 та 2 типів, радіо і не радіо об'єктами, світними і тм'яними) знайдено не було. Однак,

було підтверджено, що АЯГ здебільшого розташовані у локальних надлишках густини, порівняно з рентгенівськими галактиками. Такі результати підтверджують уніфіковану схему АЯГ, але не виключають, що оточення може мати вплив на еволюцію АЯГ.

Було застосовано геометричний метод Вороного вищих порядків для виділення галактик, пар та триплетів з вибірки огляду SDSS. Було знайдено, що галактики в ізольованих парах та триплетах мають світність у два рази вищу, ніж ізольовані галактики. Також, групи галактик у більш тісному оточенні – наприклад, що знаходяться у скупченнях, мають більшу дисперсію швидкостей та відношення маси до світності.

Було розраховано очікувані статистичні властивості для виявлення оптичних ототожнень множинних зображень квазарів з рентгенівського огляду XXL, враховуючи параметри спостережень супутника. Серед 11 тисяч квазарів очікується знайти  $\sim 20$  гравітаційно-лінзових квазарів з більше ніж двома зображеннями. Візуальний перегляд оптичних  $g$ ,  $r$  та  $i$  зображень 5500 рентгенівських АЯГ, розташованих на 11 кв. градусах огляду XMM-LSS та аналіз кольорів об'єктів дозволив знайти 3 кандидати у лінзовані АЯГ.

Знайдено, що властивості електромагнітної лавини та зображення блазарів в гамма-променях сильно залежать від магнітного поля в космічних войдах через які поширюється лавина, та від частки об'єму Всесвіту, зайнятої войдами. Така залежність може бути використана для виявлення та оцінки екстремально малого магнітного поля в космічних порожнинах. Було вивчено морфологічні властивості гамма зображень блазарів методами чисельних моделювань. Досліджено характеристики протяжного зображення, а саме форму, розподіл поверхневої яскравості та їхню залежність від характеристик міжгалактичного магнітного поля. Показано, що гамма випромінювання від протяжної частини зображення затримується близько на 10 млн. років по відношенню до прямих фотонів від джерела. Така довга затримка означає, що протяжні гало навколо можуть спостерігатися навколо блазарів, які вже не активні. Доведено, що електрон-позитронні пучки в космічних порожнинах є стабільними на масштабах набагато більших, ніж час розвитку електромагнітного каскаду. З цього випливає, що електрон-позитронні пучки від блазарів не впливають на міжгалактичне середовище.

**Ключові слова:** войди, космічні порожнечі, шукач войдів, методи вимірювання відстаней до галактик, метод Вороного, машинне навчання, АЯГ, блазари, електромагнітні лавини, міжгалактичне магнітне поле, ефект гравітаційного лінзування.

## ANNOTATION

**Elyiv A. A. Cosmis voids: structure and physical processes in and around them.** – Qualifying scientific work in the form of a scientific report. Dissertation for a Doctor of Sciences degree in Physics and Mathematics, speciality 01.03.02 Astrophysics. Radioastronomy (104 – Physics and astronomy). – Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021.

The work is devoted to the study of cosmic voids or cavities - regions in the Universe with a low concentration of galaxies. Several methods of void detection have been applied and the population of cosmic cavities has been considered. The population of galaxies surrounding voids and clusters has been studied. Distances to galaxies of the Local Universe are determined by machine learning methods. Methods of correlation function and search for overdensities were used to study the environment of different types of active galaxy nuclei (AGN) selected in the X-ray range. The second- and third-order Voronoi tessellation methods were used to find isolated pairs and triplets of galaxies; their properties were analyzed in terms of system isolation. The search for gravitational-lens systems of quasars in the X-ray field is carried out. The possibility of measuring the magnetic field in voids is analyzed, based on observations of secondary emission from electromagnetic cascades passing through them.

Two methods of searching for voids based on dynamic criteria for the selection of voids in Lagrangian coordinates were applied: the LZVF, which uses the Lagrange-Zeldovich approximation to trace back in time the orbits of galaxies located in voids and their surroundings, and the UVF that uses the observed galaxy–galaxy correlation function to relax the objects' spatial distribution to homogeneity and isotropy. In both cases voids are defined as regions of the negative velocity divergence, which can be regarded as sinks of the back-in-time streamlines of the mass tracers. The significance of the divergence signal in the central parts of the voids obtained from both finders is 60% higher than for the excess density profile obtained by the geometric method.

It is shown that the proposed void finders are promising alternatives to the existing ones, and are effective for improving the accuracy of cosmological tests based on void statistics and measuring the asymmetries of superimposed voids, for example, the Alcock-Paczynski test to improve the accuracy of cosmological parameters.

Five machine learning models have been used to determine the distance modulus of galaxies based on their observed data, such as visual magnitudes, angular diameter, surface brightness, galaxy color and coordinates, radial velocity, and known distance modulus. It has been shown that the regression model of a neural network with two hidden layers gives a more accurate result than other models. It is shown that the proposed model is competitive in comparison with commonly used secondary methods of measuring the modulus of distance, such as the Fundamental Plane method (FP) and the Tully-Fisher ratio.

An analysis of the two-point correlation function of a sample of XMM-LSS X-ray point sources (11 sq. deg) from 94 observed XMM-Newton fields ( $d = 30'$ ) containing more than five thousand point sources in soft (0.5– 2 keV) and hard (2–10 keV) ranges was performed. The amplitude of the two-point correlation function was found to be much larger in the hard than in the soft range. It has been shown that hard X-ray spectra (mostly type 2 AGN) are more clustered than soft spectra (type 1 AGN). This may mean that the two main types of AGN are in different environments, namely the AGN with a soft X-ray spectrum tend to more sparse areas of the universe, which are the boundaries of space voids.

The study of the properties of the near ( $<0.4$ –1 Mpc) and far ( $> 1$  Mpc) environment of X-ray AGN of the XXL field up to  $z = 1$  showed that the AGN of both types can be located in both close and sparse environments. It was found that X-ray AGN that also have radio counterparts are more obscured than sources that do not emit in the radio range. No significant differences were found in the large-scale environments of the different types of AGN (types 1 and 2, radio and non-radio objects, luminous and faint). However, it has been confirmed that AGN are mostly located in local overdensities compared to X-ray galaxies. Such results confirm the universal scheme of AGN but do not exclude that the environment may influence their evolution.

The higher-order Voronoi tessellation geometric method was used to select galaxies, pairs, and triplets from the SDSS survey sample. It has been found that galaxies in isolated pairs and triplets have a luminosity twice as high as isolated galaxies. Also, groups of galaxies in a closer environment, for example, in clusters, have a greater velocity dispersion and the mass to luminosity ratio.

The statistical expectations to detect optical counterparts of multiple images of quasars were estimated on X-ray XXL survey, taking into account the parameters of satellite observations. Among the 11,000 point-like sources,  $\sim 20$  gravitational-lens quasars with more than two images are expected. Visual inspection of optical g, r and i images of 5500 X-ray AGN located on 11 sq. deg. of XMM-LSS survey and color analysis allowed to find three promising candidates for lensed AGN.

It was found that the properties of the electromagnetic cascades and the image of blazars in gamma rays strongly depend on the magnetic field in the cosmic voids through which the cascade propagates, and on the proportion of the volume of the Universe occupied by the voids. This dependence can be used to detect and estimate extremely small magnetic fields in space cavities.

The morphological properties of gamma images of blazars were studied by numerical simulations. The characteristics of the extended image are studied, namely the shape, distribution of surface brightness and their dependence on the characteristics of the intergalactic magnetic field. It is shown that the gamma radiation from the extended part of the image is delayed by about 10 million years relative to the direct photons from the source. Such a long delay means that extended halos can be observed around blazars that

are no longer active. It is proved that electron-positron beams in voids are stable on a scale much larger than the time of development of the electromagnetic cascade. It follows that electron-positron beams from blazars do not affect the intergalactic medium.

**Keywords:** voids, cosmic cavities, void finder, methods for measuring distances to galaxies, Voronoi tessellation, machine learning, AGN, blazars, electromagnetic cascades, intergalactic magnetic field, gravitational lensing effect.