

УДК 524.77
№ держреєстрації
Інв. №

Національна академія наук України
Головна астрономічна обсерваторія

03143, м. Київ, вул. Академіка Заболотного, 27;
тел. 044- 526 4762, 044- 526 4763; факс 044- 526 2147

“Затверджую”

Заступник директора
ГАО НАН України
канд. фіз.-мат. наук

_____ С.Г.Кравчук
«28» грудня 2018 р.

ЗВІТ
ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ
«Новітні методи та нові знання про будову матерії у Всесвіті: опрацювання
та наповнення бази даних рентгенівських космічних місій.
Етап 1. Обробка та інтерпретація даних вибраних
позагалактичних рентгенівських джерел»
(остаточний)

Науковий керівник:
Завідувач відділу позагалактичної астрономії
та астроінформатики ГАО НАН України
кандидат фізико-математичних наук

І.Б. Вавилова

Рукопис завершено 12 грудня 2018 р.

Результати роботи розглянуто Вченою Радою ГАО НАН України,
протокол від 22 листопада 2018 р., № 16

2018

СПИСОК ВИКОНАВЦІВ

Науковий керівник, зав. відділу
позагалактичної астрономії
та астроінформатики ГАО НАН України,
канд. фіз.-мат. наук, с.н.с.

Вавилова І.Б. (вступ,
розділи 1.2, 1.3, 4.1,
4.2, реферат,
редагування звіту)

Докторант відділу позагалактичної
астрономії та астроінформатики
ГАО НАН України, канд. фіз.-мат. наук

Елиїв А.А.
(розділ 1.1, 4.1)

Ст. наук. співроб. відділу
позагалактичної астрономії та
астроінформатики ГАО НАН України,
канд. фіз.-мат. наук

Бабик Ю.В.
(розділ 1.1, 1.2)

Наук. співроб. відділу позагалактичної
астрономії та астроінформатики
ГАО НАН України, канд. фіз.-мат. наук

Василенко А.А.
(розділ 1.3)

Наук. співроб. відділу позагалактичної
астрономії та астроінформатики
ГАО НАН України, канд. фіз.-мат. наук

Добричева Д.В.
(розділ 4.2, підготовка
і редагування звіту)

Наук. співроб. відділу позагалактичної
астрономії та астроінформатики
ГАО НАН України, канд. фіз.-мат. наук

Пулатова Н.Г.
(розділ 1.3)

Наук. співроб. відділу позагалактичної
астрономії та астроінформатики
ГАО НАН України

Василенко М.Ю.
(розділ 4.1)

Пров. інженер відділу астрофізики та
елементарних частинок
ІТФ ім. М.М. Богомольця НАН України

Савченко Д.О.
(розділ 2)

Пров. інженер відділу астрофізики та
елементарних частинок
ІТФ ім. М.М. Богомольця НАН України

Рудаковський А.В.
(розділ 3)

РЕФЕРАТ

Звіт про науковий проект: 40 с., 14 рис., 2 табл., 1 дод, 30 джерел, 22 публікації виконавців.

Ключові слова: ВЕЛИКОМАСШТАБНА СТРУКТУРА ВСЕСВІТУ, АСТРОФІЗИКА ВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ, КОСМІЧНІ ОБСЕРВАТОРІЇ, БАЗА ДАНИХ, ОБРОБКА ДАНИХ

Об'єкт дослідження – галактики, скупчення галактик, Молочний Шлях.

Мета роботи: Створення та наповнення бази даних рентгенівських космічних місій, спостережні інструменти яких мають найкращу роздільну та просторову здатність; обробка та інтерпретація даних для подальшого аналізу фізичних характеристик галактичних і позагалактичних рентгенівських джерел.

Результати роботи та їхня новизна:

Розроблено оригінальні математичні методи моделювання даних і обробки зображень позагалактичних джерел, що дозволило значно покращити точність автоматичної морфологічної класифікації галактик і побудови профілів яскравості/температури рентгенівських галактик. Створено базу даних рентгенівських скупчень галактик, спостережуваних космічними телескопами Свіфт, Сузаку, ХММ-Ньютон, Чандра та Н'юСтар і Інтеграл. База даних поповнилася новими даними і використовується для побудови акумульованих профілів густини температури, світності і розподілу профілів густини баріонної/прихованої маси цих скупчень галактик. Для чотирьох ізольованих галактик з активними ядрами на червоних зміщеннях до $z < 1$ вперше розраховано спектральні характеристики за даними космічної обсерваторії Н'юСтар.

Проаналізовано розподіл лінії розпаду темної матерії на енергії 3.5 кеВ в спостереженнях центральних частин нашої Галактики та галактики Андромеди, досліджених в рамках проекту побудови карти неба в рентгенівському діапазоні. Розроблено напіваналітичний метод опису розподілу густини в гало теплої темної матерії, утвореної з ферміонів

Розроблено методи дослідження *зони уникнення Молочного Шляху* з метою реконструкції великомасштабного розподілу галактик, яке закриває зона поглинання Молочного Шляху, з урахуванням даних в X-, ГЧ-, радіо- діапазонах. Розроблено алгоритми методів машинного навчання для аналізу фізичних характеристик галактик і їхнього розподілу.

ЗМІСТ

Вступ	5
1 Скупчення галактик і галактики з активними ядрами за даними космічних місій у рентгенівському діапазоні. Нові методи і нові бази даних	8
1.1 Профілі ентропії галактик, груп і скупчень галактик за даними космічних телескопів Сузаку, ХММ-Ньютон та Чандра	8
1.2 Новий підхід до аналізу рентгенівських даних в центральних частинах скупчень галактик: розбиття на концентричні кільця, контурне розбиття, хвильковий аналіз	13
1.3 Нові дані про ізольовані галактики з активними ядрами NGC 5347, ESO 438-009, MCG -02-04-090 та IGR J11366-6002 за результатами спостережень космічним телескопом NuStar	18
2 Розподіл сигналу в лінії розпаду темної матерії на 3.5 кеВ у внутрішній частині Галактики	21
3 Напіваналітичний метод опису гало легкої ферміонної темної матерії	24
4 Методи машинного навчання як ресурс для отримання нових даних про зону уникнення Молочного Шляху і морфологічну класифікацію галактик	27
4.1 Методи дослідження зони уникнення Молочного Шляху з метою реконструкції великомасштабного розподілу галактик, яке закриває зона поглинання Молочного Шляху	27
4.2 Методи машинного навчання для аналізу фізичних характеристик галактик і їхнього розподілу	29
Висновки	31
Перелік джерел посилання	32
Публікації виконавців проекту у 2018 році	33
Додаток 1. Дані про створену та впроваджену наукову і науково-технічну продукцію (Форма IV-1 для цільових програм наукових досліджень НАН України)	38

ВСТУП

Із запуском третього покоління рентгенівських космічних телескопів стало можливим проводити детальні дослідження властивостей гарячого газу як точкових, так і протяжних позагалактичних об'єктів, із надзвичайно високою роздільною та просторовою здатностями. За останні два десятиріччя рентгенівські телескопи третього покоління проспостерігали тисячі об'єктів. Загальні обсяги таких спостережень становлять тисячі гігасекунд експозиції і терабайти даних, однак не обробленими і не проаналізованими залишається значна частина цих даних. Ще більша проблема полягає в тому, що усі ці дані не систематизовані, тому відсутня чітка картина по тому чи іншому об'єкту у вимірних параметрах. Наприклад, для скупчень галактик космічна обсерваторія «Чандра» проспостерігала близько 3 тисяч об'єктів, але найбільша вибірка цих об'єктів, АССЕРТ, налічує лише близько 300 скупчень. Інші вибірки й того менші. Ще однією проблемою є те, що всі наявні вибірки як скупчень галактик, так і інших позагалактичних об'єктів, не є однорідними, проаналізовані для різних астрофізичних завдань і, отже, параметри для одного і того ж об'єкта можуть відрізнятися.

Необхідність створення великої бази даних є актуальною. Вона повинна містити однорідно відібрані об'єкти, які були б проаналізовані однаково по відношенню від одного типу джерел до іншого (для скупчень, для галактик, для галактик з активними ядрами (АЯГ) та інших). У попередні роки за участі авторів цього проекту вже були підготовлені вибірки/ каталоги галактик та скупчень галактик, дані про які увійшли до міжнародних баз даних (HEASARC, LEDA, бази даних космічних місій) та висвітлені у створеному авторами прототипі Українського астрокосмічного центру обробки даних космічних місій на базі веб-сервісу УкрВО.

Частина з вирішених завдань і описаних у звіті нових наукових матеріалів поєднана з результатами, які автори отримали у попередньому проекті (2013-2017 рр.), а саме:

- Завершено дослідження рентгенівських властивостей ізольованих галактик з активними ядрами з каталогу 2MIG у Місцевому Всесвіті за наявними архівними даними космічних місій Chandra, Suzaku, XMM-Newton, Swift, INTEGRAL, NuStar. Отримано, що основні спектральні характеристики активного ядра ізольованих галактик у діапазоні 0.5—12 кеВ не відрізняються від таких характеристик галактик у щільнішому оточенні, а, отже, доведено, що активність ядра галактик зумовлена здебільшого внутрішніми фізичними процесами. Зокрема, за порівнянням спостережуваного прояву різних сценаріїв темпів акреції на центральну надмасивну чорну діру вперше виявлено, що окремі представники ізольованих галактик демонструють суб-едінгтонівську акрецію з характерним надлишком у м'якому рентгенівському діапазоні.

- Розроблено нові методи для обробки центральної частини рентгенівських зображень скупчень галактик, що містить найяскравішу галактику скупчення, з метою вивчення основних фізичних характеристик рентгенівських скупчень галактик та розрахунку розподілу в них баріонної і темної компонентів матерії. Спостереження проводилися за допомогою рентгенівської космічної обсерваторії Сузаку — єдиної з усіх наявних обсерваторій, котра може спостерігати розподіл міжгалактичного газу в складі скупчень уздовж усього віріального радіуса.

- Побудовано повну спектрофотометричну вибірку галактик з рентгенівським випромінюванням, спектроскопічні спостереження яких підтвердили наявність груп і галактик, котрі покривають широкий діапазон мас гало на червоних зміщеннях $z < 0.6$. Остаточна вибірка містить 32 групи та скупчення, 22111 галактик поля та 2225 груп і скупчень. 95% груп і галактик мають принаймні три спектроскопічні члени, а 70% — принаймні десять. Комбінація рентгенівських та спектроскопічних спостережень галактик в одному полі дала змогу визначити, як кінетична енергія галактик змінюється з температурою гарячого газу. Шляхом накладання попередніх обмежень на відносні енергії галактик і темну матерію виявлено степеневу зміну загальної маси з температурою.

- Проведено обробку рентгенівських даних для близько 200 галактик раннього типу та виконано повний аналіз отриманих результатів. Завдяки

інструментальним характеристикам обсерваторії Чандра, а саме найкращій роздільній здатності з усіх рентгенівських космічних обсерваторій, стало можливим визначення фізичних характеристик гарячого, міжзоряного газу, а також інших зоряних компонентів, що дають вагомий вклад в загальну світність та температуру згаданого міжзоряного газу. В результаті такої обробки визначені точніші параметри газу та побудовано співвідношення між основними характеристиками цього газу, температурою, світністю та повною масою, а також досліджено «зворотній зв'язок» АЯГ.

- Виконано дослідження впливу оточення на властивості АЯГ, відібраних з південного рентгенівського огляду XXL-South (XXL-S). Розглядалося оточення на різних позагалактичних масштабах (>1 Мпк, <0.4 Мпк) для пар галактик із активними ядрами та для угруповань більшої населеності, які були відібрані ієрархічним методом кластеризації. Виявлено, що не існує значущих відмінностей між яскравими і слабкими АЯГ в тенденції до скупчування. На малих масштабах АЯГ (незалежно від їхнього типу) переважно знаходяться у більш тісному оточенні, ніж нормальні галактики. Більша частина досліджуваних угруповань АЯГ розміщені на відстанях менше 25-45 Мпк від рентгенівських скупчень галактик.

- Виконано дослідження автоматичного визначення морфологічного складу вибірки 60 561 галактик з огляду неба SDSS DR9 ($0.02 \leq z \leq 0.06$ та $-24^m < Mr < -19.4^m$), використовуючи методи машинного навчання Naive Bayes, Random Forest, Support Vector Classifier. Для тренування класифікатора використовувалися абсолютні зоряні величини M_u , M_g , M_r , M_i , M_z , показники кольору M_u-M_r , M_g-M_i , M_r-M_z і зворотний індекс концентрації кольору до центру R_{50}/R_{90} в r -фільтрі. Бінарна морфологічна класифікація (ранні – E, що включають типи галактик E, S0, S0a; пізні – L до яких належать галактики від Sa до Irr) була виконана методом Random Forest, який показав найвищу точність, а саме, у вибірці присутні 28199 галактик раннього типу та 32362 – пізнього типу.

1 Скупчення галактик і галактики з активними ядрами за даними космічних місій у рентгенівському діапазоні. Нові методи і нові бази даних

За звітний період у 2018 році виконавцями науково-дослідної роботи була доповнена база даних результатів обробки спостережень, отриманих за допомогою рентгенівських космічних місій Suzaku, XMM-Newton, Chandra і NuStar для галактик, груп і скупчень галактик, а саме, для отримання їхніх кінематичних, динамічних та спектральних характеристик. З цією метою було проаналізовано близько тисячі спостережень в рентгенівському діапазоні. Обробка даних проводилася з використанням найновіших версій програмного забезпечення відповідних космічних місій та найновіших моделей і калібровочних бібліотек.

1.1 Профілі ентропії галактик, груп і скупчень галактик за даними космічних телескопів Suzaku, XMM-Newton та Chandra

Основними критеріями відбору об'єктів до досліджуваної вибірки скупчень галактик були параметри потоку рентгенівського випромінювання, величини червоного зміщення, відсутність ознак злиття і наявність правильної форми скупчення, що є необхідним при застосуванні умов гідростатичної рівноваги та сферичної симетрії. Зокрема, вибір обмежень для потоку обумовлювався такими критеріями:

- величина потоку повинна бути достатньо низькою, щоб вибірка була як найбільше представницькою в статистичному плані;
- і в той же час, величина потоку повинна бути достатньо високою для того, щоб надійно проводити необхідні вимірювання спектральних, кінематичних і динамічних параметрів скупчень галактик, у т.ч. прихованої і видимої маси.

Детальний аналіз показав, що величина потоку f_X (0.5–7.0 keV) = $7.0 \cdot 10^{-12}$ ерг/с/см² (або $11.3 \cdot 10^{-12}$ в діапазоні енергій (0.1–2.4 keV)) якнайкраще підходить для такого роду досліджень. Проте, варто відмітити, що дана методика обчислення потоку випромінювання не є ідеально точною, оскільки виконується автоматично. Тому на початковому етапі відбирались системи з рентгенівськими потоками, які перевищують

$7.0 \cdot 10^{-12}$ ерг/с/см², а також було обрано діапазон енергій 0.5-7.0 кеВ, який відповідає максимуму чутливості рентгенівських інструментів. Не брались до уваги спостереження, де час експозиції був занадто малим (менше 10000 с). Рентгенівські джерела, які спостерігались космічними телескопами менше 10 тис секунд, мали замалу статистику спостережень, що призводило до великих похибок під час моделювання спектрів (особливо для груп і галактик) та визначення повної маси цих об'єктів.

Зупинимось на критеріях відбору більш детально. Врахування відношення “поверхнева яскравість / фон” є важливим для отримання надійних результатів фізичних характеристик рентгенівських джерел. Обсерваторія Чандра має найкраще відношення сигналу до шуму в енергетичному діапазоні 0.5-7.0 кеВ, тому саме в цьому діапазоні проводився аналіз отриманих зображень та спектрів. Поверхнева яскравість більшості скупчень, груп та галактик (в основному, раних морфологічних типів) у вибірці значно перевищує фонову лише в достатньо малій області поблизу центра рентгенівського джерела, тому безпосереднє визначення повного рентгенівського потоку та його максимуму в широкій апертурі практично неможливе. Тому потік, зазвичай, вимірюють всередині деякого достатньо малого радіуса від центру зображення рентгенівського джерела, а потім екстраполюють на нескінченність, використовуючи певну реалістичну модель профілю поверхневої яскравості. Дотримуючись цього методу, рентгенівські інтенсивності $I(r)$ для досліджуваної вибірки було обрано із нормування β -моделі

$$I(r) \sim (1+r^2/r_0c^2) - 3\beta + 0.5,$$

що дає одну з найкращих апроксимацій даних. Звичайно, серйозною проблемою у такому випадку постає необхідність екстраполяції профілю поверхневої яскравості за межі області, що безпосередньо «покрита» даними, і ця обставина потенційно є джерелом значних похибок.

Для покращення вимірів було використано розбиття зображення на концентричні кільця з однаковою кількістю фотонів, що дозволило зменшити похибки визначення параметрів. Було обрано значення параметра β на рівні 0.67 для скупчень та груп і 0.45 для галактик, хоча відомо, що будь-яка систематична зміна β із червоним зміщенням або середньою світністю скупчення галактик може викликати помітні аберації вимірних світностей.

Отримання фізичних параметрів скупчень галактик, груп та галактик, використовуючи дані рентгенівських обсерваторій, потребує спеціального підходу до обробки зображень. Насамперед, такий метод чутливий до розбиття зображення на концентричні кільця для подальшої обробки, врахування де-проекції тощо, що важливо для побудови адекватного енергетичного розподілу вздовж радіуса. Основна частина симетричних скупчень, груп та галактик з нашої вибірки містить достатньо сильні центральні піки поверхневої яскравості, які є наслідком радіаційного охолодження газу. Відповідні центральні частини рентгенівських джерел досліджувалися більш детально.

Розподіл за червоним зміщенням z досліджуваних скупчень, груп і галактик знаходиться в межах $0.0003 \div 2.1$. Максимальне червоне зміщення $z=2.1$ відповідає скупченню галактик ICS J1438+3414, – така величина червоного зміщення джерела є поки що однією з найбільших з усіх наявних даних “Чандри” для скупчень галактик.

Варто конкретизувати, що в процесі складання вибірки, після початкового аналізу, а саме, перевірки наявності спостережень для цих скупчень в електронній базі HEASARC (High Energy Astrophysics Science Archive Research Center) та візуального огляду зображень, було проаналізовано близько 1500 спостережень для більше тисячі об’єктів.

Врахувавши усі вищезгадані критерії, нами було відібрано близько 250 скупчень галактик, 50 груп галактик та 70 індивідуальних галактик. Для обробки зображень цих джерел використовувалось програмне забезпечення та калібрувальні файли останніх найновіших версій. Зображення кожної системи було розбито на концентричні кільця з центрами у максимумах їх рентгенівських потоків. На зображеннях було спочатку знайдено і видалено точкові джерела (в основному, це галактики та активні ядра галактик). Для кожного кільця було отримано спектр, який апроксимувався моделлю WABS*MEKAL. Вплив галактичного поглинання враховувався за допомогою параметра WABS, значення якого було взято з попередніх робіт виконавців проекту. Варто відмітити, що відповідно до розміру кільця на зображенні будувалося аналогічне за розміром кільце для фону без будь-яких джерел в ньому (в процесі обробки даних фон із кінцевого спектру вилучався). Для груп та галактик до зазначеної вище моделі добавлялися кілька ступеневих та теплових компонентів для врахування вмісту зоряних

систем, що дають певний внесок у повне рентгенівське випромінювання. У випадку скупчень галактик таким вмістом можна знехтувати.

В результаті такого моделювання було отримано розподіли температури та металічності для зазначеної вибірки рентгенівських джерел. Також при моделюванні брався до уваги параметр нормування, який використовувався для побудови профілю поверхневої яскравості скупчень галактик. Похибки визначались для 68% довірчого інтервалу у програмному середовищі Xspec за допомогою команди *error*. Профілі величин згладжувались за допомогою програмного пакету DSDEPROJ. Відповідні профілі густини та температури були використані для побудови інших характеристик нашої вибірки, повної маси та маси газу, ентропії, часу охолодження, тиску та інших фізичних параметрів. Основні результати – вищезгадані профілі нашої вибірки – було поміщено в розроблений разом із співробітниками Університету Ватерлоу (Канада) веб-сайт <https://ancient-sands-40156.herokuapp.com/>. На кінець 2018 року база даних на цьому веб-сайті містить інформацію про 110 скупчень галактик та 60 груп галактик і масивних еліптичних галактик. Окремі результати подано на рис. 1.1–1.2. Фрагмент бази даних подано на рис. 1.3. Результати дослідження опубліковано в статтях [31-34, 36, 37, 42]. Результати обробки даних рентгенівських джерел і досліджень за міжнародним проектом XXL космічної обсерваторії ХММ-Ньютон подано в статтях [47-52].

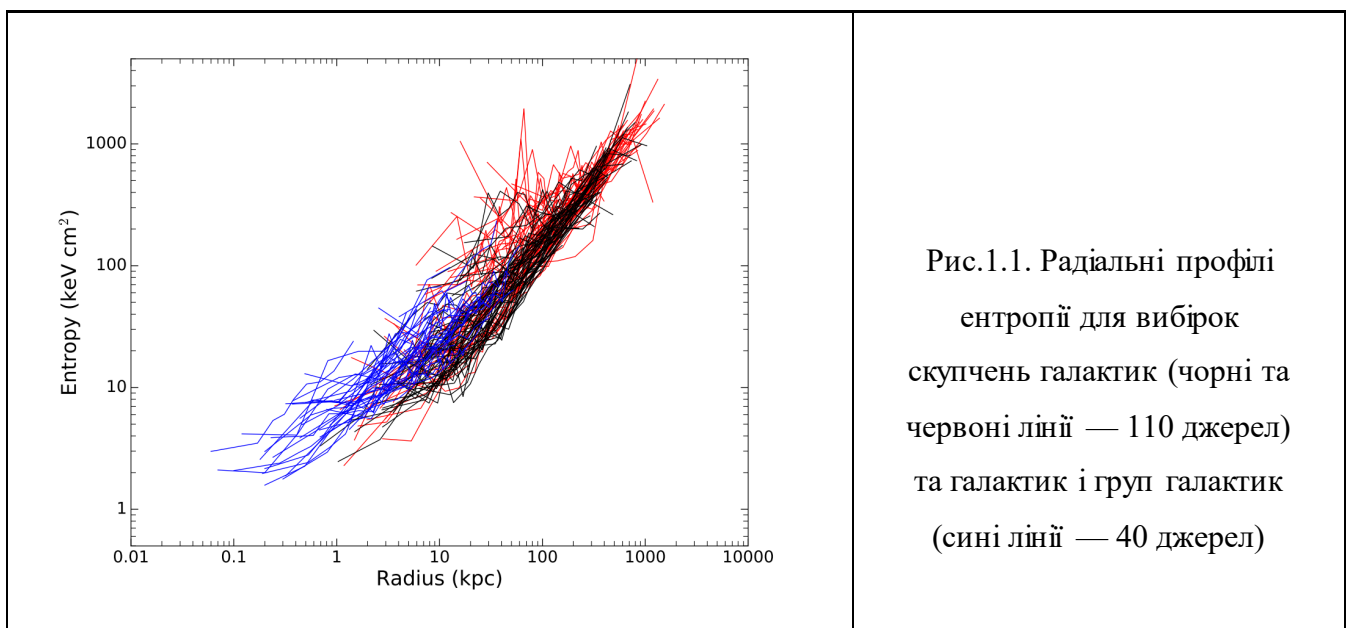


Рис.1.1. Радіальні профілі ентропії для вибірок скупчень галактик (чорні та червоні лінії — 110 джерел) та галактик і груп галактик (сині лінії — 40 джерел)

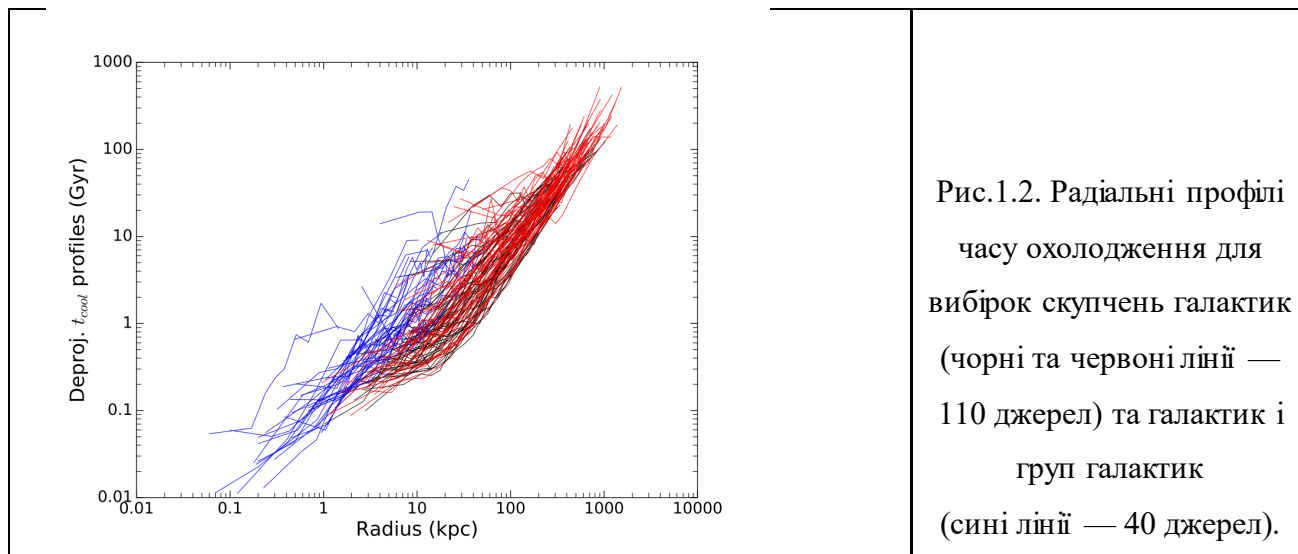


Рис. 1.3 Франгмент створенної бази даних для скупчень галактик (110 джерел) та галактик і груп галактик (40 джерел). Більш детально з даними можна ознайомитися за посиланням <https://ancient-sands-40156.herokuapp.com/>.

THE REJECT DATABASE

Department of Physics and Astronomy, University of Waterloo

You are logged in. You have database access permission.

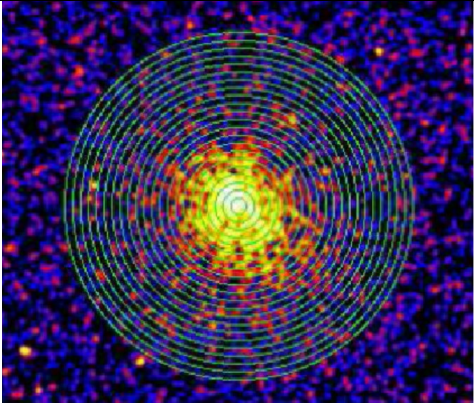
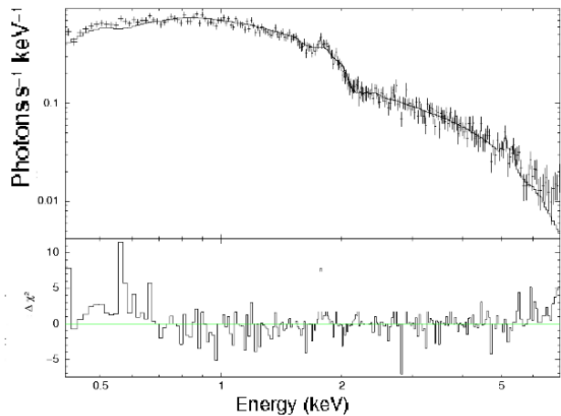
Important: Click [here](#) for column information on the projected and deprojected csv files.

	Object	RA (J2000)	DEC (J2000)	z	Projected Profile	Deprojected Profile	Reference
1	IC1262	17h33m02.0s	+43d45m35s	0.032649	↓	↓	Babyk et al. 2018b
2	IC1459	22h57m10.6s	-36d27m44s	0.006011	↓	↓	Babyk et al. 2018b
3	IC4296	13h36m39.0s	-33d57m57s	0.012465	↓	↓	Babyk et al. 2018b
4	NGC1316	03h22m41.7s	-37d12m30s	0.005871	↓	↓	Babyk et al. 2018b
5	NGC1332	03h26m17.2s	-21d20m07s	0.005084	↓	↓	Babyk et al. 2018b
6	NGC1399	03h38m29.0s	-35d27m02s	0.004753	↓	↓	Babyk et al. 2018b
7	NGC1404	03h38m51.9s	-35d35m40s	0.006494	↓	↓	Babyk et al. 2018b
8	NGC1407	03h40m11.8s	-18d34m48s	0.005934	↓	↓	Babyk et al. 2018b
9	NGC1550	04h19m37.9s	+02d24m34s	0.012389	↓	↓	Babyk et al. 2018b
10	NGC3091	10h00m14.3s	-19d38m13s	0.013222	↓	↓	Babyk et al. 2018b

1.2 Новий підхід до аналізу рентгенівських даних в центральних частинах скупчень галактик: розбиття на концентричні кільця, контурне розбиття, хвильковий аналіз

Коли обговорюються математичні методи аналізу спостережних даних для одержання розподілу основних фізичних параметрів рентгенівських скупчень галактик, треба мати на увазі такі важливі обставини. Перш за все, це *розбиття зображень скупчень галактик на концентричні кільця навколо його центру*. Це дозволяє розрахувати інтегровану кількість пікселів, що містять інформацію про температуру та інші параметри гарячого дифузного газу, потоки охолодження тощо, а також виокремити центральну, найяскравішу частину скупчення галактик (рис. 1.4 – 1.6).

Інший підхід – це так званий *"алгоритм контурного розбиття"*, який дозволяє окреслити контури на адаптивно згладженому зображенні у такий спосіб, що згенеровані області відповідають поверхневій яскравості всього зображення скупчення. Цей підхід є найбільш інформативним, якщо спектральні властивості узгоджуються з розподілом поверхневої яскравості і/або цей розподіл не є згладженим. Ми порівняли ці методи обробки зображень із використанням даних космічної обсерваторії Chandra для скупчень галактик A2029, A2107 та A2151 (див. рис. 1.7).

	
<p>Рис. 1.4. Зображення скупчення галактик A2029 у діапазоні енергій 0.5-7.0 кеВ при розбитті на концентричні кільця навколо його центру для подальшого розрахунку профілів розподілу фізичних параметрів</p>	<p>Рис. 1.5. Рентгенівський спектр центральної частини скупчення галакти A2029 у діапазоні енергій 0.4-7.0 кеВ, який змодельовано в рамках моделі гідростатичної рівноваги</p>

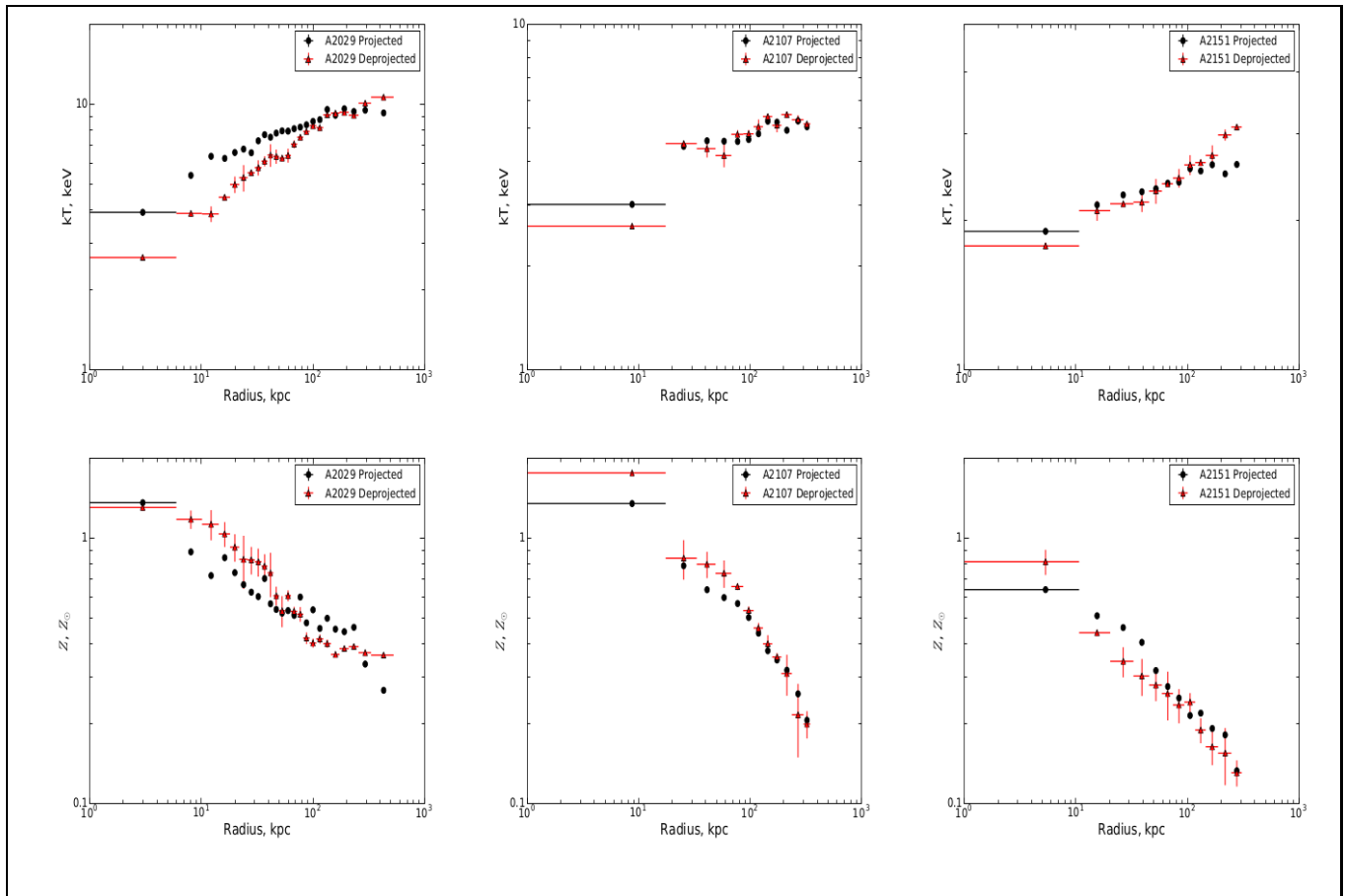


Рис. 1.6 Приклади для „проекованих“ (чорний) і „депроекованих“ (червоний) профілів радіального розподілу температури і металічності скупчень галактик Ейбела A2029, A2107, A2151

Як додатковий і новий важливий підхід обробки зображень ми дослідили застосування хвилькового аналізу типу перетворення "Мексиканський капелюх", щоб виокремити не тільки центральну частину скупчення галактик, але й підструктури, зайняті галактиками або областями міжгалактичного середовища, під час обробки їхнього контуру рентгенівського зображення. Ми дійшли висновку, що виокремлення підструктур має передувати подальшому дослідженню, оскільки їхня присутність не дозволяє застосовувати гіпотезу гідростатичної рівноваги рентгенівського газу при розгляді розподілу динамічної матерії та профілів різних фізичних параметрів вздовж радіусу скупчення галактик. Комбіноване застосування цих трьох методик може суттєво доповнити наше розуміння фізичних процесів, що відбуваються в рентгенівських скупченнях галактик.

У рентгенівській астрономії кількість світла, доступного для отримання зображення, обмежена. Це призводить до того, що потрібно використовувати підпрограми обробки зображень, отриманих від рентгенівського випромінювання, яке виходить за межі людського зору, до зображень, які можна науково описати. Немає швидкої відповіді, щоб описати, як космічна обсерваторія здатна бачити рентгенівські фотони, тому найбільша увагу в рентгенівській астрономії приділяється методам, які дозволяють описати зображення рентгенівських об'єктів максимально правдиво. Зазначимо, що наше небо не є яскравим в рентгенівському діапазоні. Це означає, що рентгенівські спостереження з експозицією 5000 секунд можуть забезпечити менше 1000 індивідуальних рентгенівських фотонів для небесного об'єкта в залежності від його інтенсивності. Рентгенівські детектори – це прилади для підрахунку фотонів, а основні рентгенівські дані зазвичай містять списки подій і властивості об'єкта. Базовий файл даних містить інформацію про подію, час детектування, положення (в детекторі та в системі небесних координат) та енергію. Таким чином, кожен подію можна розглядати в 4D просторі. Подія може мати інші цікаві ознаки, наприклад, зразок пікселів на ПЗЗ-матрицях, з яких було накопичено зарядів для цієї події (часто можна збільшити відношення сигнал-шум). Після фільтрації подій за необхідністю ми проектуємо їх уже на 1D або 2D підпростір і згортаємо їх, щоб дати зображення, енергетичні спектри або криві блиску. Файли рентгенівських даних зазвичай є обмеженими за кількістю рентгенівських фотонів, а іноді зображення, спектри та світлові криві, створені зі списків подій, можуть мати всього декілька фотонів в одному енергетичному біні.

Кожен з описаних вище наборів даних має власні програмні продукти калібрування. Наприклад, аналіз зображень використовує карти експозиції, які враховують чутливість дзеркала та детектора через поле зору (з урахуванням будь-яких змін в напрямі поля зору детектора), або функцію розподілу точок (PSF), яка враховує ймовірність того, що фотон заданої енергії відповідає положенню в заданому пікселі зображення. Енергетичний спектральний аналіз використовує відповідні матриці, які враховують ймовірність того, що фотон

заданої енергії реєструється в даному каналі детектора, як і багато інших інструментальних калібрувань, похибку, що впливає на точність аналізу даних. Якщо ми маємо занадто високий рівень відношення сигнал/шум, то відповідна похибка є домінуючою. Ми не можемо додати систематичної статистичної невизначеності, оскільки систематичні невизначеності зазвичай корелюють.

Важливо відзначити, що методи аналізу даних, розроблені в інших спектральних діапазонах, не застосовуються в рентгенівській астрономії (див., наприклад, недавні роботи Коноваленко та ін.[8], Laporte et al. [7], Mommert et al. [9], Poole et al. [10], Savanevych et al. [12,13], а також різні методики аналізу даних наземних і космічних телескопів у різних спектральних діапазонах). Взяти до уваги дані для рентгенівських зображень та спектрів, ми можемо відібрати необхідні "події" за допомогою "фільтрів" для конкретної області потрібних об'єктів. З цих подій ми в змозі побудувати спектри і вписати їх в спектральний пакет, наприклад, *Xspec*, для аналізу зображень рентгенівських даних. Прості геометричні фігури, такі як кільця, коробки, сектори, еліпси тощо, можна використовувати для призначення фільтра цих областей.

Припускаючи сферичну симетрію і використовуючи кільця, можна побудувати радіальні профілі скупчень галактик. Однак слід зазначити, що найбільш поширені джерела не є симетричними, про що свідчать приклади методів обробки зображень і спектрів трьох скупчень галактик A2029, A2107, A2151, які спостерігалися космічною обсерваторією Chandra для вивчення їхнього морфологічного різноманіття (рис. 1.7). Для дослідження ефективності цих різних методів аналізу рентгенівських зображень ми вибрали рентгенівські спостереження з часом не менше 10 кс. Інформація для цих вибраних об'єктів була взята з баз даних NED, Simbad, HyperLEDA. Відстані до скупчень галактик були розраховані за допомогою величин червоних зміщень і космологічної Λ CDM моделі з такими параметрами: $H_0 = 70$ км/с/Мпк, $\Omega_m = 0.3$, і $\Omega_\Lambda = 0.7$. Всі досліджені скупчення галактик спостерігалися за допомогою інструменту ACIS.

Двовимірний радіальний хвильковий аналіз є дуже інформативним для виявлення субструктур у структурі скупчень галактик. Один з цих методів – „Мексиканський капелюх“ як основна платформа для програмного коду – була введена у науковий обіг в роботах [2, 16] для виокремлення галактик у скупченні при аналізі його зображень. Домінуючою умовою у цих роботах було те, що поле зображення у видимому спектральному діапазоні повинне охоплювати розмір скупчення галактик [2, 3, 4, 17], – але це є тим самим випадком і для рентгенівських зображень скупчень галактик. Алгоритми хвилькового аналізу для виділення підструктур працюють на різних масштабах скупчення галактик. У разі пошуку підструктури завдання полягає в тому, щоб згорнути розподіл двовимірних об'єктів (сигнальна функція $s(r)$) на сітці $N \times N$ пікселів за допомогою її аналізу хвилькової функції $F(r, a)$, де a позначає масштаб хвильки. Цей параметр визначає ступінь поширення розподілу об'єктів у просторі хвилькових коефіцієнтів WC і дозволяє зробити подальший аналіз, який діє у цьому віртуальному просторі коефіцієнтів. Цікаво, що метод Мексиканський капелюх працює з радіальними формами зображень, але здатний виявляти некругові субструктури [18]. Серед робіт, де використовувалися різні платформи для програмного коду хвилькового аналізу для виявлення підструктур у скупченнях Ейбелла або для аналізу турбулентних рухів міжкластерного середовища, відмітимо такі [1, 4, 5, 6, 11, 14, 15].

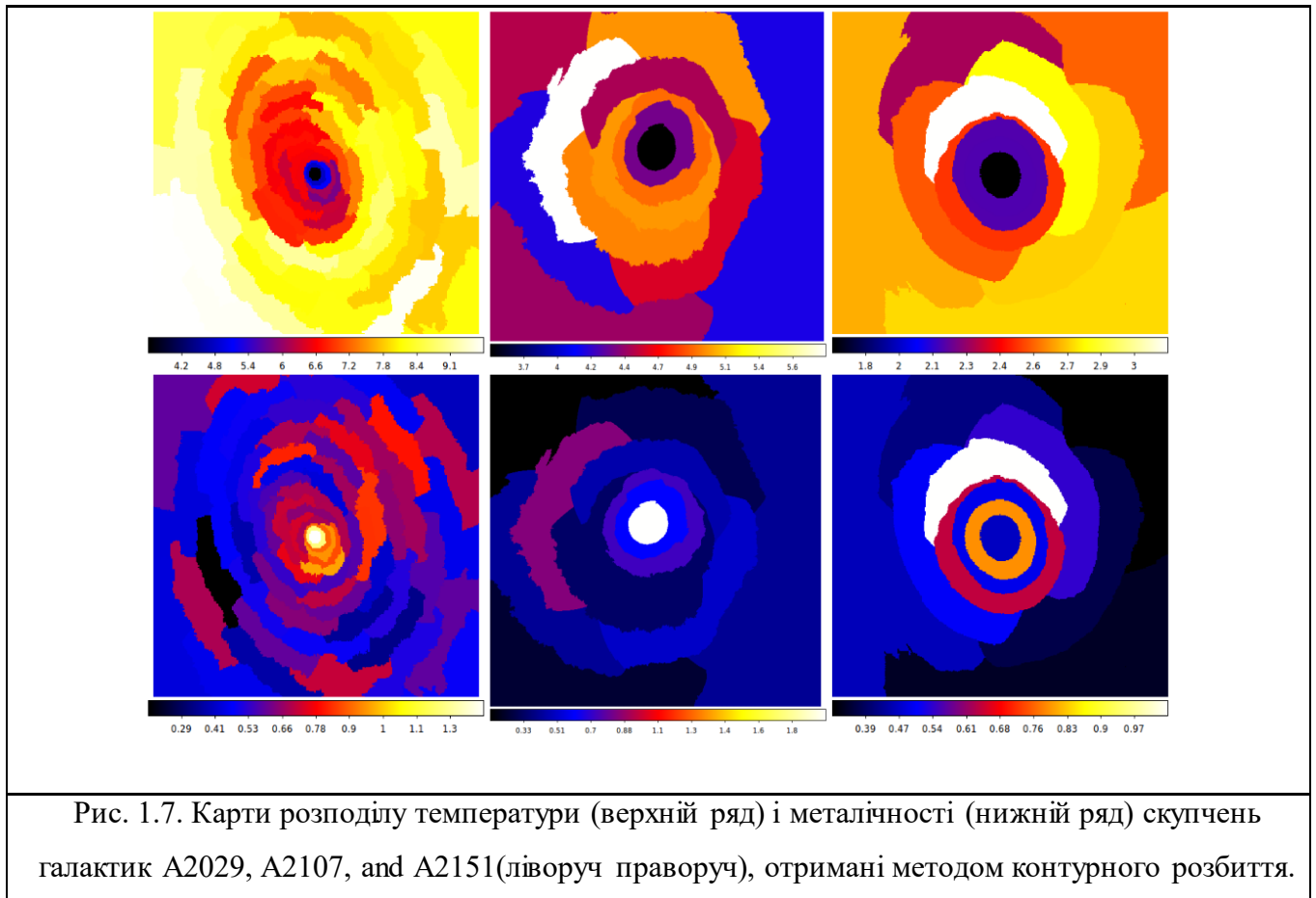
Алгоритм виокремлення підструктури в зображеннях джерел можна коротко описати таким чином:

- 1) визначення центру зображення скупчення галактик;
- 2) нормалізація даних за допомогою лінійного перетворення в діапазон $[-1, 1]$, що дає радіус аналізованого поля $R_f = 1$;
- 3) пошук за шкалою хвильки за допомогою формули Мексиканського капелюха: $F(r, a) = (2 - r^2 / a^2) \exp(-r^2 / a^2)$, де a – масштаб хвильки, r – відстань між центром зображення і точкою (x, y) , де розраховується Мексиканський капелюх;

4) аналіз суперпозицій Мексиканського капелюха на мережі $N \times N$ пікселів, яка замінила розподіл координат компонентів скупчення галактик, з якого йде рентгенівське випромінювання;

5) вибір масштабу хвильки a обумовлений критерієм, що найменший масштаб $a = 0.01R_f$ може відповідати окремим галактикам або областям внутрішньокластерного газу, тоді як шкала $a=0.25R_f$ може відповідати центральній частині скупчення галактик, особливо у випадку багатих скупчень галактик Ейбела;

6) перевірка результатів, використовуючи зокрема моделювання Монте-Карло.



Таким чином, запропонований підхід дозволяє виявити більш щільні області й найменші підструктури в компонентах скупчення галактик по відношенню до їх положення (у системі координат зображення скупчення, використовуючи Мексиканський капелюх як метод виявлення таких підструктур, і привязати ці координати до реальних підструктур скупчення галактик,

підбираючи при моделюванні різні масштаби хвильки). Іншими словами, якщо стандартні методи і способи контурного розбиття дозволяють конструювати радіальні профілі фізичних параметрів, то хвильковий аналіз (Мексиканський капелюх або алгоритм "true") дозволяє виділяти підструктури у просторовій структурі на найменших масштабах, а, отже, місцеположення (координати) відповідних компонентів скупчення галактик, що значно покращує фізичну інтерпретацію тих процесів, які відбуваються в центральній, навколоцентральної та периферійній частинах скупчення галактик або галактик з активними ядрами (див. статтю [41]).

1.3 Нові дані про ізольовані галактики з активними ядрами NGC 5347, ESO 438-009, MCG -02-04-090 та IGR J11366-6002 за результатами спостережень космічним телескопом NuStar

Вперше для чотирьох ізольованих галактик з активними ядрами NGC 5347, ESO 438-009, MCG-02-04-090 та IGR J11366-6002, вибраних з каталогу 2MIG, виконано спектральний аналіз у рентгеновському діапазоні 3-79 кеВ, використовуючи дані супутника NuStar. Одночасно з цими даними, для отримання спектру в більш широкому діапазоні, були використані дані космічного телескопа Swift [20], а саме, Swift/BAT до 150 кеВ для MCG 02-09-040 та J11366-6002, а також дані Swift/XRT в діапазоні 0,3–10 кеВ для NGC 5347, ESO 438-009 та J11366-6002 (рис. 1.8).

Встановлено, що всі джерела мають компоненту відбитого спектру з різними частками відбиття відносно до степеневого первинного континууму. Ми виявили, що степеневі індекси для вибраних джерел лежать між 1,7 і 2. У спектрах двох джерел - NGC5347 та MCG-02-09-040 виявлено наявність емісійної лінії Fe K α . Ця лінія в обох об'єктах має помірно велику еквівалентну ширину EW~1 кеВ. Також ми зазначаємо, що спектр MCG-02-04-090 показує наявність нейтрального сильного поглинання з величиною $N_H \sim 10^{24}$ см⁻². При чому, отримана величина відбиття для стандартної моделі показує нефізичну величину. Більш фізично обґрунтовану величину можна отримати при наближенні певної геометрії поглиначка, наприклад, тороподібної форми. У цьому

випадку поглинання має подібну величину $N_{\text{H}} \sim 1,04 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$, але відбиття при цьому описується фізично коректно.

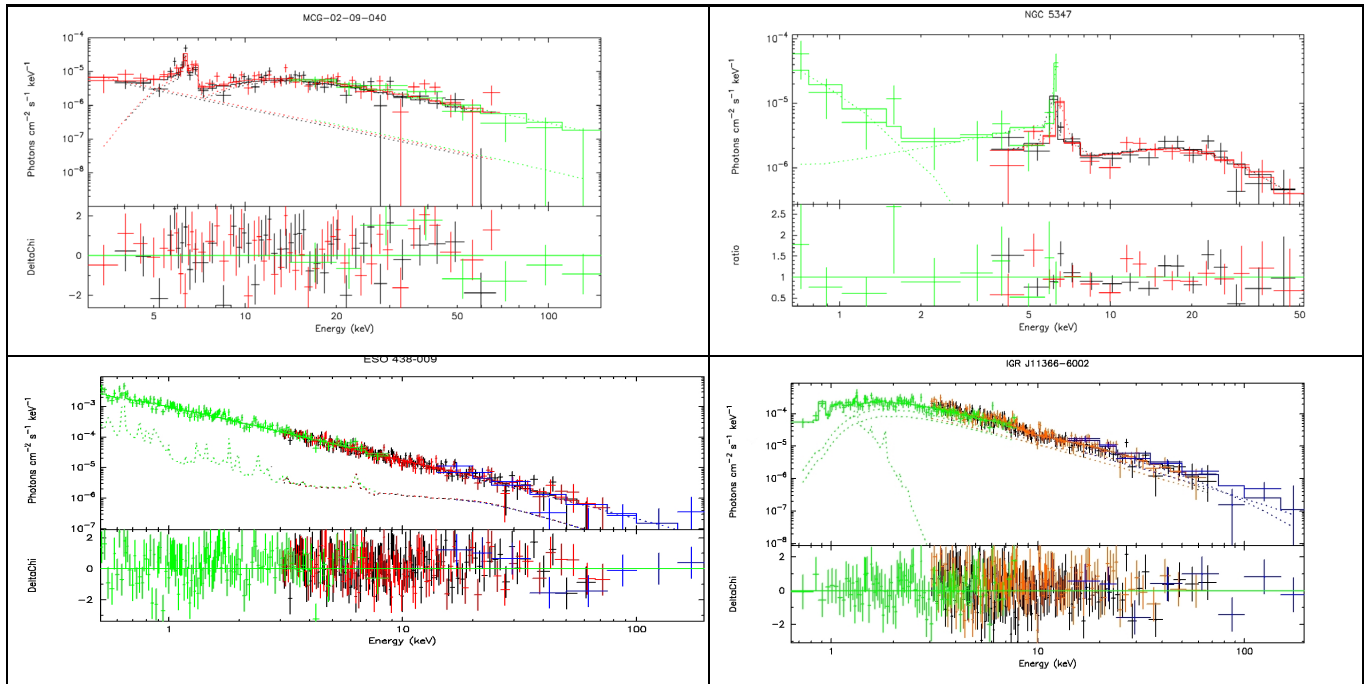


Рис. 1.8 Енергетичний спектр досліджуваних ізольованих галактик з активними ядрами, отриманий за допомогою КА *NuStar* (червоний і чорний кольори) and *Swift/XRT/BAT* (зелений і/або блакитний кольори)

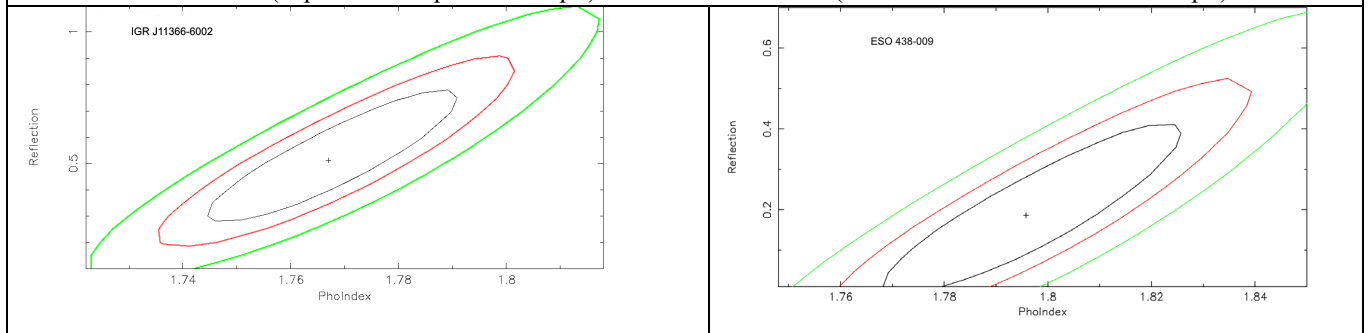


Рис. 1.9. Приклади контурних карт 99 %, 90 %, 68 % для пошуку кореляції величини відбиття і фотонного індексу для двох із досліджуваних галактик з активними ядрами

За цими матеріалами подано статтю [40] до друку в журнал «Космічна наука і технологія» як окремий результат за цією науково-дослідною роботою, виконаної в рамках Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень, тому звіт за цим розділом скорочено.

2. Розподіл сигналу на лінії розпаду темної матерії 3.5 кеВ у внутрішній частині Галактики

З'ясування природи темної матерії є однією з цілей майже кожного великого експерименту в астрофізиці і фізиці частинок. На сьогодні дуже мало відомо власне про параметри частинок темної матерії; зокрема, їх маси в різних моделях можуть відрізнятися на десятки порядків. Однією з найбільш перспективних гіпотез стосовно темної матерії є та, що дані частинки мають відносно малу масу, суттєво меншу за масу електрона. Такі частинки природно виникають в багатьох розширеннях стандартної моделі, наприклад у мінімальному нейтринному розширенні Стандартної моделі фізики частинок, ν MSM, яке дозволяє пояснити, окрім темної матерії, ще два основних спостережних явища за межами Стандартної моделі — осциляції нейтрино (удостоєні Нобелівської премії з фізики 2015 року) та асиметрії між речовиною та антиречовиною у видимій частині Всесвіту.

Існують два основні нетривіальні астрофізичні ефекти легкої темної матерії:

- можливий розпад частинки темної матерії на фотон і іншу частинку утворює вузьку слабку лінію випромінювання від гало темної матерії. Порівнюючи потоки і положення сигналу в різних космічних об'єктах можна з'ясувати, чи він походить від розпаду частинок темної матерії.

- зміни в процесі утворення структур на малих масштабах: як і звичайні нейтрино, частинки темної матерії мають народжуватись в ранньому Всесвіті з релятивістськими початковими швидкостями і не колапсувати в гравітаційні потенціальні ями, поки Всесвіт не охолоне.

В процесі пошуків лінії розпаду темної матерії на початку 2014 р. у спектрах багатьох об'єктів був знайдений сигнал на енергії 3.5 кеВ, що не пояснюється відомими атомними лініями випромінювання і узгоджується з передбаченнями від розпаду темної матерії. Лінія знайдена в спостереженнях всіх наявних великих рентгенівських космічних місій; майбутні місії мають остаточно визначити її природу [21]. Дослідження лінії було одним із завдань місії Hitomi.

На жаль, *Nitomi* зазнав аварії незабаром після запуску, і тому його спостереження дозволяють лише виключити один із механізмів генерації сигналу.

Відомо, що сигнал від розпаду темної матерії вирізняється наступними властивостями:

- положення по енергії визначається масою частинки темної матерії та червоним зміщенням гало;
- потік лінії пропорційний до стовпчикової (2-вимірної) густини темної матерії;
- ширина лінії розпаду визначається розподілом швидкостей темної матерії, які відрізняються від швидкостей видимої матерії.

У зв'язку із запланованим запуском місії *Micro-X* для спостереження Галактичного центру, особливий інтерес наразі становить дослідження сигналу в його околі. В області Галактичного центру і Галактичного балджу накопичено велику кількість спостережень, однак в контексті дослідження сигналу на енергії 3.5 кеВ аналізувались лише внутрішня 30 пк (14') область (див. наприклад [22], в якій присутнє сильне поглинання, що може спричинювати подавлення сигналу в декілька разів. Окрім того, розподіл темної матерії у внутрішніх частинах гало є недостатньо дослідженим.

Для того, аби зменшити невизначеність, пов'язану з Галактичним поглинанням і структурою гало темної матерії, ми дослідили спектри з більш віддалених від центру областей Галактичного балджу.

Ми використовували всі публічні дані обсерваторії *XMM-Newton* з області 10° навколо Галактичного центру. Дані спостережень оброблялись стандартними процедурами програми *Extended Sources Analysis Software (ESAS)*. Дані були очищені від змінної протонної компоненти, точкові джерела вирізані процедурою *edetect_chain* пакету *SAS*. Були отримані спектри і файли відгуку інструмента в областях перекриття спостережень і кількох кільцевих областей навколо центру Галактики. Зважені на площу потоки у відповідних спектрах порівнювались, і спектри з високими відносно середнього потоками – відкидались. Отримані спектри комбінувались в відповідних областях з допомогою процедури *addspec*

пакету HEASOFT. Отримані комбіновані спектри моделювались сумою поглиненого континууму, інструментального фону і близьких атомних ліній. Результати моделювань наведені в Таблицях 2.1, 2.2 і на Рис. 2.1.

Відомо, що потік від розпаду темної матерії визначається стовпчиковою густиною темної матерії в полі зору інструменту:

$$F = \frac{E_\gamma}{m_{\text{DM}} \tau_{\text{DM}}} \int_{\text{fov cone}} \frac{\rho_{\text{DM}}(\vec{r})}{4\pi |\vec{D}_L + \vec{r}|^2} d^3\vec{r} \simeq \frac{\Omega_{\text{fov}}}{8\pi m_{\text{DM}} \tau_{\text{DM}}} S$$

$$S = \int_{\Omega_{\text{fov}}} \rho_{\text{DM}}(r) dr$$

Отже, можна оцінити обмеження на поведінку профіля, що узгоджується зі спостережуваними потоками. При виборі профіля у вигляді узагальненого профіля Наварро–Френка–Уайта $\rho \sim (r/r_s)^{-\alpha} (1 + r/r_s)^{\alpha-3}$ ми показали, що внутрішня форма профіля гало темної матерії відповідає коефіцієнту $\alpha \simeq 1.7$. При оцінці враховано ефективні площі і положення використаних спостережень.

Публікація готується до друку.

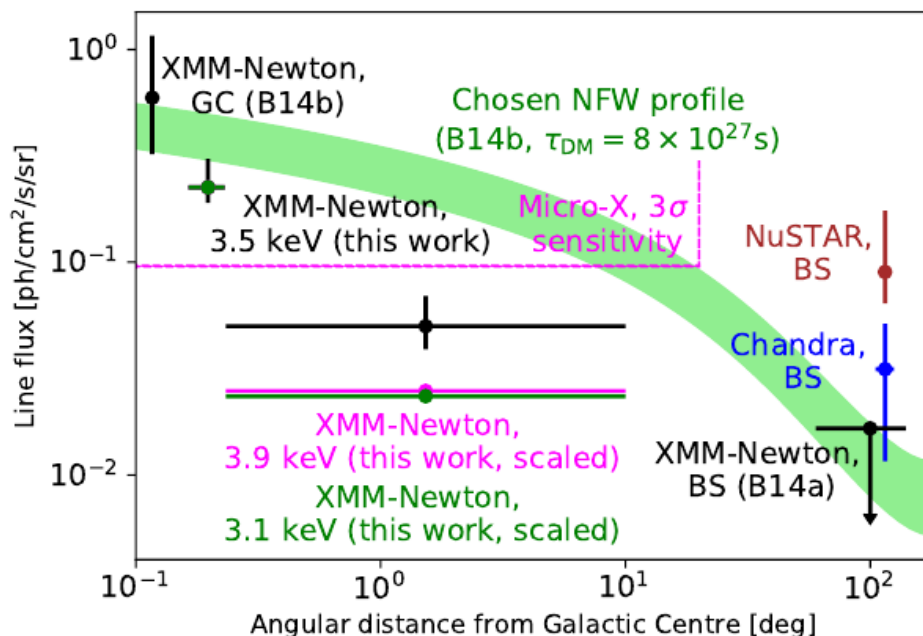


Рис. 2.1. Кутовий розподіл потоків ліній на 3.5 keV, а також близьких атомних ліній. Також зображені потоки та обмеження, отримані іншими авторами [22, 23, 24, 25], оцінка на чутливість запланованої місії Micro-X і один з можливих профілів розподілу темної матерії (має велику невизначеність, обраний з даних попередніх робіт [22]).

Таблиця 2.1. Результати моделювань, область 10-600'. Потоки в 10^{-6} фот./см²/с, положення в кеВ, експозиції в Мс, поле зору в аркмін²

	MOS	PN	MOS+PN
Експозиція MOS/PN	8.3	2.6	8.3/2.6
Поле зору MOS/PN	341	352	341/352
χ^2	113/98	71/58	199/165
Положення 3.5 кеВ	3.52±0.01	3.49±0.03	3.51±0.01
Потік 3.5 кеВ	3.0±0.6	1.6±0.7	2.6±0.3 (2.7)
$\Delta\chi^2$	57.5	9.7	68.9
Потік 3.1 кеВ	42.8±0.7	39.7±1.1	41.7±0.3
Потік 3.3 кеВ	9.4±0.6	6.5±0.5	8.5±0.4
Потік 3.7 кеВ	8.1±0.5	7.6±0.8	7.9±0.4
Потік 3.9 кеВ	23.0±0.5	23.4±0.8	22.7±0.3

Таблиця 2.1. Результати моделювань, по областям. Потоки в 10^{-6} фот./см²/с, положення в кеВ, експозиції в Мс, поле зору в аркмін²

	10-14'	14-600'	10-600'
Експозиція MOS/PN	3.1/1.1	5.1/2.5	8.3/2.6
Поле зору MOS/PN	205/197	425/466	341/352
χ^2	202/171	183/171	199/165
Положення 3.5 кеВ	3.54±0.02	3.50±0.02	3.51±0.01
Потік 3.5 кеВ	3.9±0.8	1.8±0.4	2.6±0.3 (2.7)
$\Delta\chi^2$	40.7	26.2	68.9
Потік 3.1 кеВ	87.4±0.7	18.9±0.4	41.7±0.3
Потік 3.3 кеВ	15.2±0.6	5.3±0.3	8.5±0.4
Потік 3.7 кеВ	14.4±0.9	4.5±0.4	7.9±0.4
Потік 3.9 кеВ	47.2±0.7	10.8±0.3	22.7±0.3

3 Напіваналітичний метод опису гало легкої ферміонної темної матерії

Розподіл густини у гало темної матерії, змодельованих за допомогою симуляцій, добре описуються так званим профілем Наварро-Френка-Уайта (NFW профіль, [26]) на великих відстанях. Він передбачає сингулярну густину темної матерії в центрі гало (касп). Однак спостереження показують, що густина в центрі гало є скінченною величиною (кор). Також, фазова густина, що відповідає NFW профілю, є нескінченною в центрі гало. Однак, це неможливо у моделях ферміонної темної матерії (наприклад, для стерильних нейтрино), бо це протирічить принципу Паулі, згідно з якому фазова густина ферміонного гало не може перевищувати деякого максимального значення $f_{max}(m_{FD})$.

Нами було запропоновано новий ітераційний напіваналітичний підхід отримання реалістичного профілю густини ферміонної темної матерії (truncated NFW профіль, tNFW) [38], функція розподілу якої у фазовому просторі залежить лише від одного інтегралу руху, енергії та пов'язана з густиною темної матерії за допомогою перетворення Еддінгтона. На великих радіусах він співпадає з NFW профілем, але відповідна фазова густина не перевищує деякого максимального значення f_{max} .

Отримані густини гало темної матерії добре описують спостережні дані та співпадають з результатами чисельних симуляцій (Рис.3.1, 3.2).

Обмеження на моделі темної матерії з даних спостережень періоду реіонізації Всесвіту. У моделях легкої темної матерії може змінитися формування космологічних структур на малих масштабах, зокрема, має зменшитися концентрація малих та середніх галактик та згладитися розподіл темної матерії в їх центрах. Характеристики таких структур можуть бути передбачені або за допомогою комп'ютерних моделювань з високою роздільною здатністю, які вимагають значних чисельних ресурсів, або за допомогою аналітичних підходів з використанням чисельних методів (т. зв. «напіваналітичний опис формування структур»). Раніше групою виконавців із Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Богомольця НАН України було показано, що спостереження реіонізації у Всесвіті

суттєво краще описуються у моделях легкої темної матерії, ніж у загальноприйнятій моделі з холодною темною матерією. Однак, врахування процесів баріонного впливу, які видувають газ із галактик малих розмірів і подавляють зореутворення в них, можуть значно зменшити вищезгадану різницю. Інший спостережний ефект, який може бути пояснений як у моделі легкої темної матерії, так і за допомогою зворотного впливу баріонів – плавна поведінка профілю густини гало темної матерії поблизу центру (комп'ютерні симуляції у моделі холодної темної матерії передбачають нескінченну густину у центрі гало, так звані “каспи” темної матерії).

Процес формування структур, таких як галактики, має сильно залежити як від моделі темної матерії, так і від складних процесів зореутворення, випромінювання та поглинання фотонів у ранньому Всесвіті. Зокрема, наявність релятивістських початкових швидкостей у частинок темної матерії має значно подавити формування малих галактик. Відбитком процесу формування структур і є фкраз процес реіонізації – іонізації міжгалактичного газу першими джерелами фотонів (першими зірками у галактиках та, можливо, квазарами).

Використовуючи просту напіваналітичну модель реіонізації (т.зв. “модель бульбашок”) для 7 кеВ стерильних нейтрино (мотивованих нещодавним відкриттям) в якості темної матерії отримано, що модельно незалежні спостережні дані щодо об'ємної долі нейтрального водню в епоху реіонізації описуються трохи краще, ніж у стандартній моделі холодної темної матерії. Однак, отримана різниця між передбаченнями у вище згаданих моделях темної матерії недостатня для статистично значимого вибору на користь однієї з вище згаданих моделей [39].

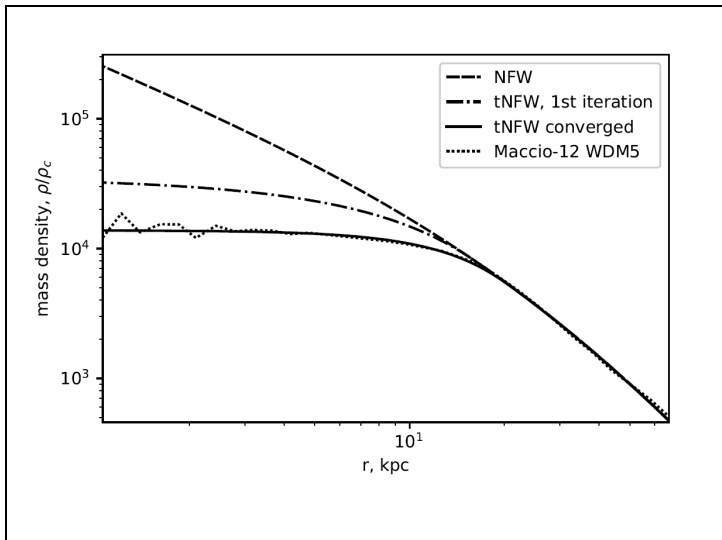


Рис. 3.1. Порівняння розподілів густини для симуляцій WDM-5 [27] та відповідний tNFW профіль, базуючись на стартовому NFW профілі з параметрами $M_{200} = 5.54 \cdot 10^{11} M_{\odot}$, $c_{200} = 4$ та використовуючи масу частинки $m_{FD} = 23 \text{ eV}$.

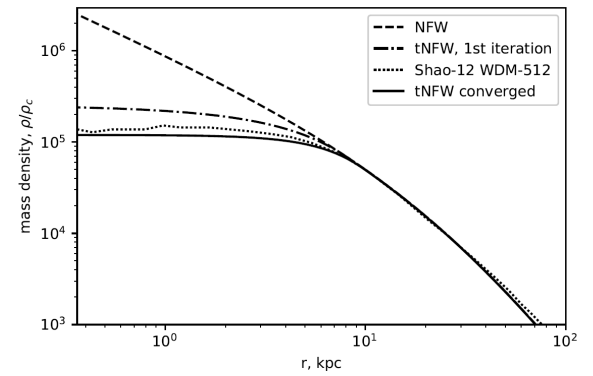


Рис. 3.2. Порівняння tNFW профілю з результатами N-body симуляцій P-WDM₅₁₂ [28]. Ми стартували з NFW профілю з $M_{200} = 1.44 \cdot 10^{12} M_{\odot}$ та $c_{200} = 11$, що відповідає параметрам P-WDM₅₁₂. Потім було побудовано tNFW профіль для $m_{FD} = 30 \text{ eV}$

4 Методи машинного навчання як ресурс для отримання нових даних про зону уникнення Молочного Шляху і морфологічну класифікацію галактик

4.1 Методи дослідження зони уникнення Молочного Шляху з метою реконструкції великомасштабного розподілу галактик, яке закриває зона поглинання Молочного Шляху

За звітний період 2018 року виконано огляд прямих (спостереження) і непрямих (математичне та чисельне моделювання) методів, які застосовуються для відтворення розподілу великомасштабних структур Всесвіту за зоною уникнення (ZoA) Чумацького Шляху в радіо, інфрачервоному і рентгенівському спектральних діапазонах. Це дозволило розробити новий “алгоритм штопання зони уникнення” і новий підхід, що ґрунтується на методах машинного навчання, таких як генеруючій змагальній мережі (GAN) для відновлення можливого розподілу галактик в ZoA з використанням оптичних оглядів у якості додаткової платформи для програмування штучних нейронних мереж.

Завдяки моніторинговим спостереженням всього неба в радіо (проект DOGS, спостереження в лінії HI), інфрачервоному (IRAS і та 2MASS огляди) і рентгенівському спектральних діапазонах, ZoA “зменшила” свої розміри, наразі закриває від спостерігача близько 10 % просторового розподілу галактик в оптичному діапазоні. Вимірювання реліктового випромінювання (СМВ) показали асиметрію в 180° , відому як диполь [29]: незважаючи на те, що результуючий вектор знаходиться в межах 20° спостережуваного диполя СМВ, розрахунки залишаються досить неоднозначними, частково тому, що не враховуються галактики в ZoA і концепція “атракторів” вимагає перегляду. Наразі аналіз просторового розподілу галактик і їх скупчень у областях, що оточують зону уникнення галактик, залишається складною і невирішеною проблемою, а оцінка “невидимого” просторового розподілу галактики, яке закриває від спостерігача зона поглинання, є вкрай своєчасною [19]. Для відновлення розподілу галактик в ZoA можливе використання непрямих методів, включаючи непрямі оцінки усереднених змінних; методи обробки сигналів, що застосовуються до

прихованих і неповних даних; методи мозаїки Вороного і т. ін тощо. Ці методи відновлення, проте, працюють тільки для великомасштабних структур в зоні уникнення галактик; вони практично не чутливі до окремих галактик і малонаселених скупчень галактик. Одним з рішень є використання методик машинного навчання, зокрема як наприклад GAN, для моделювання “невидимого” просторового розподілу галактик за цією зоною.

Неповнота даних, що залежить від довжини хвилі, на якій проводилися виконувалися огляди, свідчить про те, що невирішеними залишилися такі проблеми, як динаміка Місцевої Групи і ближнього Всесвіту; великомасштабна структура Всесвіту в області неба, прихованою нашою Галактикою; поля потоків швидкості галактик до Великого Атрактора, диполь СМВ. Ми пропонуємо новий “алгоритм штопання зони уникнення” і загальну схему GAN (рис. 4.1) в якості додаткової платформи машинного навчання для відновлення просторового розподілу галактик за зоною уникнення Чумацького Шляху нашої Галактики [47].

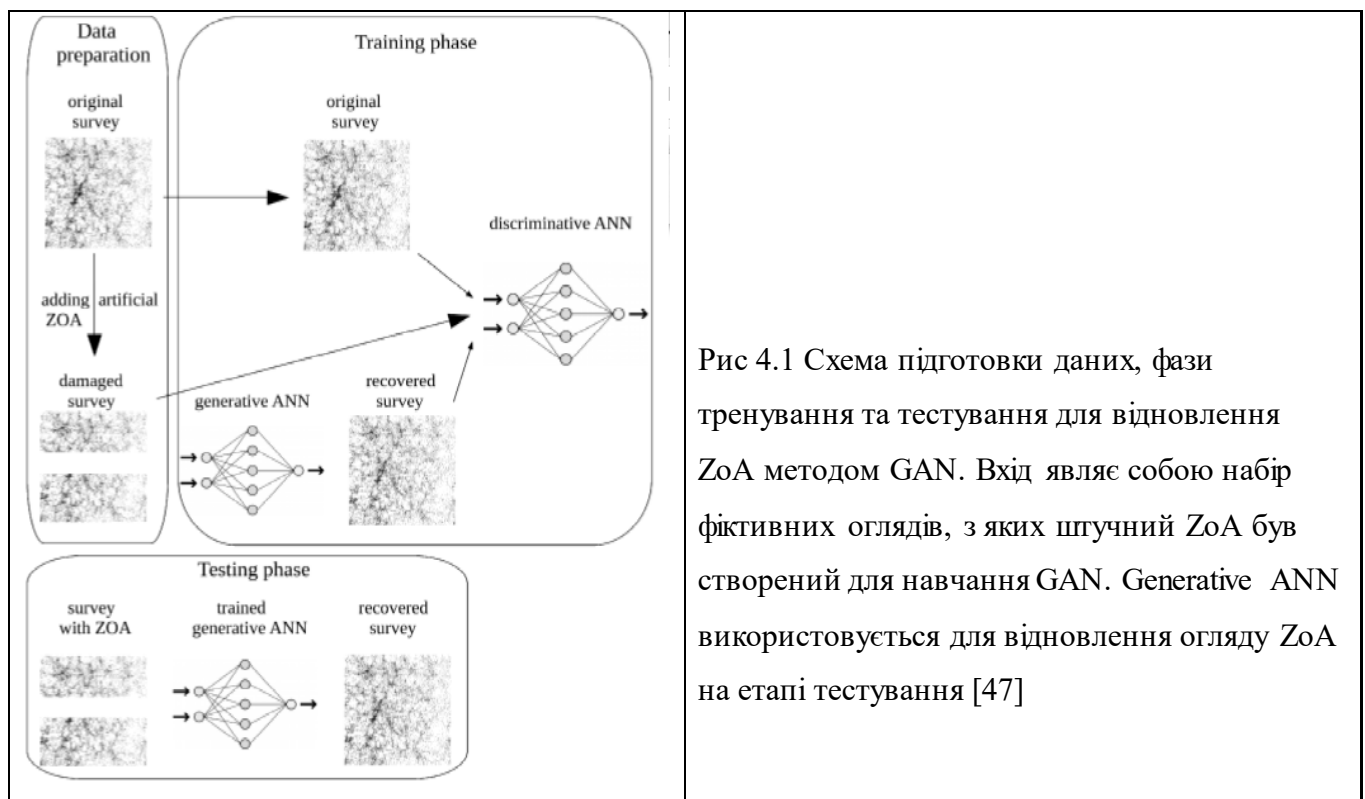


Рис 4.1 Схема підготовки даних, фази тренування та тестування для відновлення ZoA методом GAN. Вхід являє собою набір фіктивних оглядів, з яких штучний ZoA був створений для навчання GAN. Generative ANN використовується для відновлення огляду ZoA на етапі тестування [47]

4.2 Методи машинного навчання для аналізу фізичних характеристик галактик і їхнього розподілу

За звітній період була проведена оцінка точності методів машинного навчання без учителя як функцію від розміру тренувальної вибірки. Метод, який набрав більшу точність був застосований для бінарної морфологічної класифікації вибірки галактик з огляд неба SDSS DR9 з невідомими морфологічними типами.

Бінарна морфологічна класифікація проводилась за допомогою програмного забезпечення Analytics KNIME. 3.5.3, яке призначене для класифікації даних різними методами машинного навчання та активно використовується в науці.

Досліджувана вибірка становила 60 561 галактик огляду SDSS DR9 з червоним зміщенням $0.02 < z < 0.06$ та абсолютною зоряною величиною $-24^m < M_r < -19.4^m$. На основі програмного забезпечення WEKA та нейтральних мереж (RProp MLP), ми застосувували наступні методи класифікації: наївний байєс, випадковий ліс, метод опорних векторів. Для навчання класифікатора ми використали абсолютні зоряні величини: M_u , M_g , M_r , M_i , M_z , показники кольору $M_u - M_r$, $M_g - M_i$, $M_u - M_g$, $M_r - M_z$ і зворотній індекс концентрації до центру $R50/R90$.

Ми перевірили зміну точності методів машинного навчання як функцію від розміру тренувальної вибірки. Якщо точність методу перестає збільшуватись зі збільшенням тренувальної вибірки це означає достатню кількість елементів вибірки. Але якщо точність продовжує зростати, швидше за все, це не зашкодить збільшенню кількості навчальних даних. Ми зробили наступні кроки з тренувальною вибіркою $N = 6\,749$ галактик для яких відомі морфологічні типи:

- поділили її на підвибірки, які містять наступну кількість галактик: 100, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000, 6740;
- елементи кожної підвибірок було сформовано випадковим чином 10 разів;
- після, працювані в KNAME.

Виявилось, що метод випадкового лісу забезпечує найвищу точність — 92,9% правильно класифікованих (96% — ранній морфологічний тип (E) і 84% —

пізній морфологічний тип (L). Точність решти від 87% до 90% (рис. 4.2). В нашій попередній роботі [30] ми теж використовували показники кольорів M_u-M_r , M_g-M_i , M_u-M_g , M_r-M_z і зворотній індекс концентрації до центру $R50/R90$ для класифікації галактик. Точність для E типу становила 96% і для L типу — 67%, однак, тренувальна вибірка в [30], була також і тестовою, а це означає, що реальна точність була принаймні на кілька відсотків нижче. Також для оцінки точності був застосований метод перехресної перевірки: ми розділили тренувальну вибірку випадковим чином на 5 підвбірок, по черзі, чотири з яких служили тренувальними і одна тестовою. Така процедура повторюється 5 разів. Точність класифікації визначається як середня величина тестових підвбірок.

Таким чином, використовуючи інформацію про абсолютні зоряні величини, показники кольору, зворотній індекс концентрації до центру та тренуючи класифікатор випадковий ліс галактиками з візуально визначеними морфологічними типами, ми отримали морфологічні типи галактик тестової вибірки ($N = 60\,561$ галактик) серед них 25 180 галактик раннього типу і 35 381 пізнього морфологічного типу. За результатами роботи опубліковано статтю [35] та прийнято до друку статті [43–45].

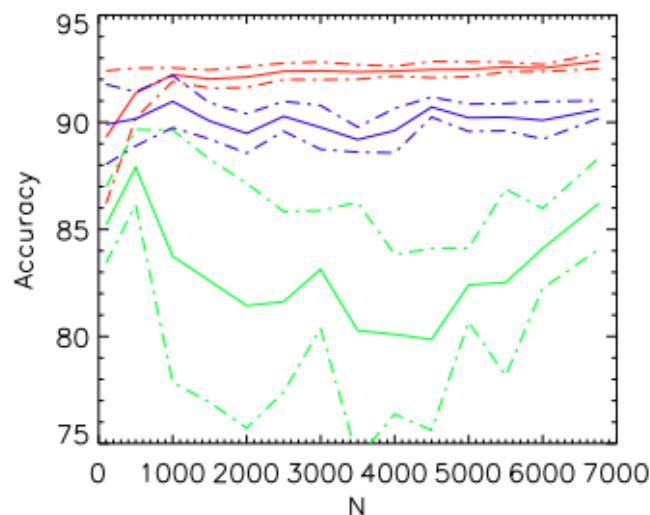


Рис. 4.2. Перевірка точності методів машинного навчання як функцію від розміру тренувальної вибірки. Червона лінія (Random Forest), синя лінія (Support Vector Classifier) та зелена лінія (Naive Bayes) показують середню точність 10 повторень процедури оцінки.

ВИСНОВКИ

Роботу за договором виконано в повному обсязі.

За результатами досліджень підготовлено 22 публікації, з яких

- опубліковано 14 наукових статей у реферованих виданнях,
- прийнято до друку 6 статей і 1 розділ в іноземній монографії,
- подано до друку 1 статтю.

Результати досліджень доповідалися на 8 міжнародних і всеукраїнських конференціях.

Створена у 2016-2017 роках база даних позагалактичних рентгенівських джерел доповнена новими посиланнями.

Розроблено оригінальні математичні методи моделювання даних і обробки зображень позагалактичних джерел, що дозволило значно покращити точність автоматичної морфологічної класифікації галактик і побудови профілів яскравості/температури рентгенівських галактик та відтворювати структуру Всесвіту за зоною уникнення Молочного Шляху.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Bardelli S., Pisani A., Ramella M. et al.: 1998, MNRAS, 300, 2, 589
2. Escalera E. et al.: 1994, ApJ, 423, 539
3. Flin P, Vavilova I.B.: 1995, SISSA Ref. 65/95/A, World Scientific Press, p. 117-122
4. Flin P., Vavilova I.B.: 1997, Astrophys. Letters & Communications, 36, 113
5. Flin P., Krywult J.: 2006, A&A, 450, 1, 9
6. Gambera M., Pagliaro A., Antonuccio-Delogu V., Becciani, U. 1997, ApJ, 488, 1
7. Laporte N., Bauer F.E., Troncoso-Iribarren P. et al.: 2017, A&A, 604, id.A132, 16 p.
8. Konovalenko A., Sodin L., Zakharenko V. et al.: 2016, Experimental Astronomy, 42, 1, 11
9. Mommert M., Moskovitz N., Trilling D.E.: 2016, AAS DPS meeting, 48, id.123.42
10. Poole T.S., Breeveld A.A., Page M.J. et al: 2008, MNRAS, 383, 2, 627
11. Rostagni F., Benoist C., Maurogordato S.: 2012, SF2A-2012, 477
12. Savanevych V.E., Briukhovetskyi O.B., Sokovikova N.S. et al.: 2015, MNRAS, 451, 3, 3287
13. Savanevych V.E., Khlamov S.V., Vavilova I.B. et al.: 2018. A&A, 609, id.A54, 11 p.
14. Schwinn J., Baugh C. M., Jauzac M. et al.: 2018, MNRAS, bf 481, 4, 4300
15. Shi Xun, Nagai D., Lau E.T.: 2018, MNRAS. 481, 1, 1075
16. Slezak E., Bijaoui M., Mars G.: 1990, A&A, 227, 301
17. Vavilova I.B., Flin P.: 1997, In ADASS VI, ASP Confer. Ser., 125, 186
18. Vavilova I.B.: 1997, Data Analysis in Astronomy, Proc. 5th Workshop, World Scientific Press, 297
19. Vavilova I.B.: 2000, Kinemat. Fiz. Nebesn. Tel, Suppl. no. 3, 155
20. Vavilova I. B., Vasylenko A.A., Babyk Iu.V., Pulatova N. G.: 2015, Odessa Astron. Publ., 28, 150

21. Adhikari et al. A White Paper on keV sterile neutrino Dark Matter, JCAP 1 (Jan, 2017) 021
22. Boyarsky A., Franse J., Iakubovskiy D. and Ruchayskiy O., Checking the Dark Matter Origin of a 3.53 keV Line with the Milky Way Center, Phys. Rev. Lett. 115 (2015) 161301
23. Boyarsky A., Ruchayskiy O., Iakubovskiy D. and Franse J., Unidentified Line in X-Ray Spectra of the Andromeda Galaxy and Perseus Galaxy Cluster, Physical Review Letters 113 (Dec., 2014) 251301
24. Cappelluti N. et al., Searching for the 3.5 keV Line in the Deep Fields with Chandra: the 10 Ms observations, Astrophys. J. 854 (2018) 179
25. Neronov A., Malyshev D. and Eckert D., Decaying dark matter search with NuSTAR deep sky observations, Phys. Rev. D 94 (Dec., 2016) 123504
26. Navarro J. F., Frenk C. S., and White S. D. M. The Structure of Cold Dark Matter Halos, ApJ 462, 563 (1996)
27. Shao S., Theuns T., Frenk C. S. The phase-space density of fermionic dark matter haloes. MNRAS 430,2346 (2013)
28. Macciò V., Paduroiu S., Anderhalden D., Schneider A. and Moore B. Cores in warm dark matter haloes: a Catch 22 problem. MNRAS, 424, 1105 (2013)
29. Vasylenko M.Yu., Kudrya Yu.N. Dipole bulk velocity based on new data sample of galaxies from the catalogue 2MFGC. Advances in Astronomy and Space Physics. 2017. Vol. 7. Issues 1-2. P. 6-11.
30. Melnyk, O. V.; Dobrycheva, D. V.; Vavilova, I. B. Morphology and color indices of galaxies in Pairs: Criteria for the classification of galaxies. Astrophysics, Volume 55, Issue 3, pp.293-305, 2012

Публікації виконавців наукового проекту у 2018 році

31. **Babyk, Iu. V.**; McNamara, B. R.; Nulsen, P. E. J.; H. R. Russell. Non-gravitational heating in hot atmospheres of clusters, groups, and galaxies. 2018 (submitted to *Astrophys. Journal*, arxiv:1802.02589)
32. **Babyk, Iu. V.**; McNamara, B. R.; Tamhane, P.; Nulsen, P. E. J.; Russell, H. R.; Edge, A. C. Origins of molecular clouds in early-type galaxies. 2018 (submitted to *Astrophys. Journal*, arXiv:1810.11465)
33. **Babyk, Iu. V.**; McNamara, B. R.; Nulsen, P. E. J.; Russell, H. R.; Vantyghem, A. N.; Hogan, M. T.; Pulido, F. A. A Universal Entropy Profile for the Hot Atmospheres of Galaxies and Clusters within R2500 . 2018, *Astrophys. Journal*, vol. 862, 39
34. **Babyk, Iu. V.**; McNamara, B. R.; Nulsen, P. E. J.; Hogan, M. T.; Vantyghem, A. N.; Russell, H. R.; Pulido, F. A.; Edge, A. C. X-Ray Scaling Relations of Early-type Galaxies. 2018. *Astrophys. Journal.*, Vol. 857, 32
35. **Dobrycheva D.V., Vavilova I.B., Melnyk O.V. and Elyiv A.A.** Morphological Type and Color Indices of the SDSS DR9 Galaxies at $0.02 < z \leq 0.06$. 2018. *Kinemat. Phys. Celest. Bodies*. 2018. Vol.34. Issue 6. p. 290-301.
36. Hogan, M. T.; McNamara, B. R.; Pulido, F. A.; Nulsen, P. E. J.; Vantyghem, A. N.; Russell, H. R.; Edge, A. C.; **Babyk, Iu. V.**; Main, R. A.; McDonald, M. The Onset of Thermally Unstable Cooling from the Hot Atmospheres of Giant Galaxies in Clusters: Constraints on Feedback Models. 2017, *Astrophys. Journal*, 851, 66
37. Pulido, F. A.; McNamara, B. R.; Edge, A. C.; Hogan, M. T.; Vantyghem, A. N.; Russell, H. R.; Nulsen, P. E. J.; **Babyk, Iu. V.**; Salome, P. The Origin of Molecular Clouds in Central Galaxies. 2018, *Astrophys. Journal*, 853, 177
38. **Rudakovskiy A., Savchenko D.** New model of density distribution for fermionic dark matter halos. *Ukrainian Journal of Physics*. 2018. Vol. 63(9), pp.769-776
39. **Rudakovskiy A.** and Iakubovskiy D. Dark matter model favoured by reionization data: 7 keV sterile neutrino vs cold dark matter. 2018 (accepted to *MNRAS*).
40. **Vasylenko A.A., Vavilova I.B., Pulatova N.G.** NuStar vision of isolated AGNs. *Space Sci. & Technol.*, vol. 25, 2019 (подано до друку)

41. **Vavilova I.B., Babyk Yu.V.** New approach for analysis of the X-ray data in cores of galaxy clusters: binning on the concentration rings, contour binning, and wavelet transforms. *Odessa Astron. Publ.* 2018. vol. 31. p. 239-246.
42. Vavilova I.B. Tests of the gravitational redshift effect in space-born and ground-based experiments. *Space Sci.&Technol.* 2018, 24(1). P. 31-48
43. **Vavilova I., Dobrycheva D., Melnyk O., Elyiv A.** The automated morphological classification of galaxies from the SDSS at $z < 0.1$ by the machine learning technique. Proceedings IAU Symposium No. 349, 2018 (подана до друку в матеріали цієї конференції, 2019)
44. **Vavilova Iryna, Elyiv Andrii, Dobrycheva Daria, Melnyk Olga.** Voronoi tessellation in a spatial galaxy distribution (подана до друку у журнал *Mathematics and its Applications. Proceedings of the Institute of Mathematics of the NAS of Ukraine*, 2019)
45. **Vavilova I.B., Dobrycheva D.V.** Big Data Bases in Extragalactic Astronomy: Description, Methods of Processing, Machine Learning (прийнято до друку розділ в іноземній монографії видавництва “Knowledge Discovery in Big Data from Astronomy and Earth Observation (AstroGeoInformatics), 2019, Elsevier)
46. **Vavilova I.B., Elyiv A.A., and Vasylenko M.Yu.** Behind the Zone of Avoidance of the Milky Way: What can we rescore by direct and indirect methods? *Radio phys. radio astron.* 2018. 23(4). P. 244-257.
47. Koulouridis E., Ricci M., Giles P., Adami C., Ramos-Ceja M., Pierre M., Plionis M., Lidman C., Georgantopoulos I., Chiappetti L., **Elyiv A.**, Etori S., Faccioli L., Fotopoulou S., Gastaldello F., Pacaud F., Paltani S., Vignali C. The XXL Survey. XXXV. The role of cluster mass in AGN activity. 2018, *A&A*, 620, id.A20, 10 pp.
48. Guglielmo V., Poggianti B. M., Vulcani B., Moretti A., Fritz J., Gastaldello F., Adami C., Caretta C. A., Willis J., Koulouridis E., Ramos Ceja M. E., Giles P., Baldry I., Birkinshaw M., Bongiorno A., Brown M., Chiappetti L., Driver S., **Elyiv A.**, Evrard A., Grootes M., Guennou L., Hopkins A., Horellou C., Iovino A., Maurogordato S., Owers M., Pacaud F., Paltani S., Pierre M., Plionis M.,

- Ponman T., Robotham A., Sadibekova T., Smolčić V., Tuffs R., Vignali C. The XXL Survey: XXX. Characterisation of the XLSSsC N01 supercluster and analysis of the galaxy stellar populations - 2018, *A&A*, 620, id.A15, 16 pp.
49. Chiappetti L., Fotopoulou S., Lidman C., Faccioli L., Pacaud F., **Elyiv A.**, Paltani S., Pierre M., Plionis M., Adami C., Alis S., Altieri B., Baldry I., Bolzonella M., Bongiorno A., Brown M., Driver S., Elmer E., Franzetti P., Grootes M., Guglielmo V., Iovino A., Koulouridis E., Lefèvre J. P., Liske J., Maurogordato S., Melnyk O., Owers M., Poggianti B., Polletta M., Pompei E., Ponman T., Robotham A., Sadibekova T., Tuffs R., Valtchanov I., Vignali C., Wagner G. The XXL Survey: XXVII. The 3XLSS point source catalogue - 2018, *A&A*, 620, id.A12, 18 pp.
50. Farahi Arya, Guglielmo Valentina, Evrard August E., Poggianti Bianca M., Adami Christophe, Ettori Stefano, Gastaldello Fabio, Giles Paul A., Maughan Ben J., Rapetti David, Sereno Mauro, Altieri Bruno, Baldry Ivan, Birkinshaw Mark, Bolzonella Micol, Bongiorno Angela, Brown Michael J. I., Chiappetti Lucio, Driver Simon P., **Elyiv Andrii**, Garilli Bianca, Guennou Loïc, Hopkins Andrew, Iovino Angela, Koulouridis Elias, Liske Jochen, Maurogordato Sophie, Owers Matthew, Pacaud Florian, Pierre Marguerite, Plionis Manolis, Ponman Trevor, Robotham Aaron, Sadibekova Tatyana, Scodreggio Marco, Tuffs Richard, Valtchanov Ivan. The XXL Survey: XXIII. The Mass Scale of XXL Clusters from Ensemble Spectroscopy - 2018, *A&A*, 620, id.A8, 13 pp.
51. Guglielmo V., Poggianti B. M., Vulcani B., Adami C., Gastaldello F., Ettori S., Fotopoulou S., Koulouridis E., Ramos Ceja M. E., Giles P., McGee S., Altieri B., Baldry I., Birkinshaw M., Bolzonella M., Bongiorno A., Brown M., Chiappetti L., Driver S., **Elyiv A.**, Evrard A., Garilli B., Grootes M., Guennou L., Hopkins A., Horellou C., Iovino A., Lidman C., Liske J., Maurogordato S., Owers M., Pacaud F., Paltani S., Pierre M., Plionis M., Ponman T., Robotham A., Sadibekova T., Scodreggio M., Sereno M., Smolčić V., Tuffs R., Valtchanov I., Vignali C., Willis J. The XXL Survey: XXII. The XXL-North spectrophotometric

sample and galaxy stellar mass function in X-ray detected groups and clusters - 2018, A&A, 620, id.A7, 20 pp.

52. Melnyk O., Elyiv A., Smolčić V., Plionis M., Koulouridis E., Fotopoulou S., Chiappetti L., Adami C., Baran N., Butler A., Delhaize J., Delvecchio I., Finet F., Huynh M., Lidman C., Pierre M., Pompei E., Vignali C., Surdej J. The XXL Survey. XXI. The environment and clustering of X-ray AGN in the XXL-South field - 2018, A&A, 620, id.A6, 11 pp.

Додаток 1.

Форма IV-1
(Для цільових програм наукових досліджень НАН України
та цільових наукових (науково-технічних) проектів НАН України)

Дані про створену та впроваджену наукову і науково-технічну продукцію

Класифікація наукової (науково-технічної) продукції	Створено продукції	Впроваджено продукції
1. Види виробів (прилади і системи, пристрої, агрегати, установки та їх компоненти; лабораторні макети і дослідні зразки; хімічні речовини, препарати, біологічно активні речовини; програмні продукти)	Програмно-математичне забезпечення для наукових завдань	
1.1. з них техніки		
2. Технології		
3. Матеріали		
4. Сорти рослин та породи тварин		
5. Методи, теорії (в тому числі і наукові концепції)	«Метод шпопання зони уникнення Молочного Шляху»; метод обробки центральних частин зображень рентгенівських джерел	
6. Інше:		
6.1. Заключні чи проміжні звіти	Заключний звіт	
6.2. Монографії (або їх глави)	Розділ у монографії	
6.3. Підручники, посібники, довідники, словники		
6.4. Рекомендації, методичні рекомендації, технологічні рекомендації, методики, технологічні інструкції.	База даних рентгенівських джерел	
6.5. Проекти законодавчих та нормативних актів (закон, концепція, стратегія, стандарт тощо)		
6.6. Математичні моделі		
6.7. Технічна документація, технічні умови, стандарт, регламент, тощо		
6.8. Наукові, аналітичні доповіді та записки		
6.9. Експертні (науково-експертні) висновки		
6.10. Відібрані штами та лінії мікроорганізмів, культури клітин; дослідні та експериментальні зразки біологічного походження, колекції		

Вказати також:

27 – кількість друкованої продукції:

1 - розділ в іноземній монографії,

21- статей у наукових фахових журналах,

21- статей у наукових фахових журналах, що входять до міжнародних баз даних

– кількість поданих заявок на видачу охоронних документів;

– кількість одержаних охоронних документів.