

# БУДОВА ТА ЕВОЛЮЦІЯ ВСЕСВІТУ НА ГАЛАКТИЧНИХ ТА КОСМОЛОГІЧНИХ МАСШТАБАХ, ПРИХОВАНА МАСА І ТЕМНА ЕНЕРГІЯ: ТЕОРЕТИЧНІ МОДЕЛІ ТА СПОСТЕРЕЖНІ РЕЗУЛЬТАТИ

*Берцик П.П., Вавилова І.Б., Жданов В.І., Жук О.І.,  
Караченцева В.Ю., Мінаков А.О. (помертено), Новосядлий Б.С.,  
Павленко Я.В., Пелих В.О., Пілюгін Л.С.*

## **АНОТАЦІЯ**

*Подана робота є підсумком колективних досягнень авторів, які охоплюють широке коло теоретичних та спостережних проблем і становлять значний внесок у розвиток української школи позагалактичної астрономії і космології. Вперше отримано низку результатів як у розвитку Стандартної космологічної моделі, так і її узагальнень з використанням додаткових вимірів та скалярних полів. Запропоновано нові підходи до виявлення та дослідження просторового розподілу матерії, будови та вмісту галактик. Отримано пріоритетні результати щодо кінематики, динамічної та хімічної еволюції нашої та інших галактик, а також фізико-хімічної еволюції ультрахолодних зір як важливого складника прихованої баріонної матерії. Створено нові каталоги галактик з урахуванням їх фізичної природи, які знаходять широке використання для вивчення розподілів видимої і прихованої маси.*

## **Вступ**

Упродовж останнього десятиріччя отримано нові астрономічні дані, що кардинально змінили уявлення про сучасний етап космологічного розширення та поставили нові завдання перед фундаментальною фізикою. Дослідження будови Всесвіту свідчать, що частка звичайної баріонної речовини (до якої належать планети, зорі і галактики; міжпланетні та міжгалактичні газ і пил) складає не більше 5% від середньої густини матерії у Всесвіті. Основна частка припадає на так звані “темну енергію” (TE, – приблизно 73%) та “темну матерію” (ТМ, – приблизно 22%). Перед сучасною наукою постали проблеми ідентифікації та вивчення цих невидимих компонент матерії. Роботи в цьому напрямку бурхливо розвиваються в усьому світі й належать до найпріоритетніших досліджень.

*Загальновідомо, що єдиним джерелом експериментальних даних, які підтверджують існування ТМ і ТЕ, залишаються саме астрономічні дослідження.* Ця обставина стимулювала становлення нового наукового напрямку, відомого під назвою "космомікрофізика" (astroparticle physics), змістом якого є як використання астрономічних даних для вивчення мікробудови матерії, так і даних про мікробудову для розуміння еволюції Всесвіту. Саме з розгляду космологічних та астрофізичних систем наразі можна отримати обмеження на мікроскопічні моделі ТМ і теоретико-польові моделі ТЕ. Не применшуючи важливості досліджень елементарних частинок в наземних лабораторіях, слід відзначити, що жодні прискорювачі не здатні відтворити фізичні умови ранніх стадій еволюції Всесвіту. Але ці умови та характеристики фундаментальних взаємодій вплинули на характеристики реліктового випромінювання, на спектри потужності контрасту густини маси на різних масштабах, з якими пов'язані розподіли певних класів астрономічних об'єктів, хімічний склад баріонної речовини в галактиках. Ці дані про будову Всесвіту на галактичних і космологічних масштабах є також і єдиним

джерелом нетривіальної інформації про ТМ і ТЕ, тому актуальною є розробка нових астрономічних методів для отримання та інтерпретації цієї інформації. Будучи непростю задачею самою по собі, вона додатково ускладнена ще й тим, що значна частина спостережень стосується сучасної епохи і вимагає екстраполяції на більш ранні часи. Тим більшою є цінність результатів стосовно астрофізичних об'єктів, які фактично містять первинну речовину, таких як G-карлики та карликові неправильні галактики, як ТМ в гало галактик і в гало груп та скупчень галактик.

Представлена робота відображає досягнення авторського колективу та його фундаментальний внесок у зазначених напрямках позагалактичної астрономії і космології. Задачі цього комплексного дослідження можна умовно розбити на три рівні відповідно до просторових та часових масштабів об'єктів вивчення, хоча ці рівні взаємоперетинаються.

1. На **глобально-космологічному рівні** виникає потреба аналізу *узагальнень Стандартної космологічної моделі* та відсіювання нежиттєздатних теорій, розробки *моделей ТМ і ТЕ*.

2. На **позагалактичних масштабах** дослідження будови Всесвіту потребує розробки *теоретичних передбачень космологічної моделі з холодною темною матерією і космологічною сталою, а також її узагальнень*. З іншого боку, цей напрямок вимагає детального аналізу *новітніх спостережень великомасштабних структур Всесвіту* та розробки нових *методів отримання космологічних даних*.

3. На **галактичних масштабах** виникає низка проблем, пов'язаних з дослідженнями та інтерпретацією *фізико-хімічних властивостей* галактик, моделюванням їхньої *еволюції*. Це вимагає розробки ефективних методів отримання параметрів як окремих галактичних об'єктів, так і галактик в цілому.

### **Глобальні моделі будови та еволюції Всесвіту: теорія та спостереження**

В сучасній фізиці існує чітке розуміння, що розгляд дуже ранніх, зокрема, інфляційних, стадій еволюції Всесвіту, а також природи ТЕ і ТМ потребує істотних змін Стандартної космологічної моделі. В роботах авторів ці пріоритетні питання розглянуто в рамках моделей з додатковими просторово-часовими вимірами та з додатковими космологічними полями.

*Багатовимірна космологія* є новим напрямком у науці про Всесвіт, який має фундаментальне значення не лише для космології та астрофізики, але і для фізики елементарних частинок. Пріоритетні результати у цьому напрямку було отримано в роботах О. Жука, які отримали широке визнання. У цих роботах знайдено низку *нових точних розв'язків для багатовимірних космологічних моделей* в класичній області, цінність яких полягає у тому, що вони дозволяють детально досліджувати динамічну поведінку зовнішніх і внутрішніх просторів і порівнювати цю поведінку зі спостережуваною картиною Всесвіту. Пріоритетні результати отримано щодо *квантування цих багатовимірних моделей* і пошуку *нових точних розв'язків квантових рівнянь*. Отримані точні розв'язки були першими з відомих розв'язків квантового рівняння Уілера-ДеВітта з багатовимірної космології. Ще один напрямок досліджень пов'язаний з фундаментальною проблемою сумісності багатовимірних теорій Калуци-Клейна з класичними гравітаційними тестами. Визначено фізичні критерії, яким повинні задовольняти життєздатні теорії. Було

запропоновано модель "гравітаційних екситонів" як кандидата на роль частинок ТМ, причому ефективний потенціал, що виникає у цих теоріях після розмірної редукції, відіграє роль ТЕ. Низка результатів пов'язана з класичними гравітаційними тестами у багатовимірних гравітаційних теоріях.

В роботах Б. Новосядлого щодо *моделей ТЕ зі скалярним полем* вперше встановлено параметри ТМ, які впливають із даних спостережень наднових типу Ia, *характеристик* великомасштабної структури Всесвіту та анізотропії температури реліктового випромінювання. Показано, що *скалярне поле, як динамічна темна енергія із змінною густиною та параметром рівняння стану, дає можливість кращого узгодження зі спостереженнями*, ніж стандартні моделі з космологічною сталою; разом із тим моделі без ТЕ слід відкинути на рівні достовірності, більшому за 99,99%.

Визначні відкриття у космології і астрофізиці часто супроводжуються критичним аналізом базових понять загальної теорії відносності (ЗТВ). Одним з них є поняття гравітаційної енергії в ЗТВ. В роботах В. Пелиха створено та обґрунтовано новий *тензорний метод доведення теореми про додатність гравітаційної енергії* в асимптотично плоских просторах ЗТВ. Показано геометричну природу спірного поля Вітена, яке використовується при дослідженнях енергії в ЗТВ, і вказано, що цей висновок зберігає свою силу і в присутності темної енергії. Принциповим моментом будь якої теорії є однозначність та існування розв'язків рівнянь, а також обґрунтування наближених методів, що використовуються. В. Ждановим ці проблеми розглянуто у *динаміці зі скінченною швидкістю поширення взаємодій* (притаманній будь-якій релятивістській теорії), а також у релятивістській гідродинаміці. В релятивістській динаміці для модельних рівнянь руху тіл, які враховують запізнення взаємодій, доведено *збіжність ітераційної процедури*, яка обґрунтовує застосування стандартних наближених методів. В релятивістській магнітній гідродинаміці дано обґрунтування умов існування ударних хвиль у *середовищах з загальним рівнянням стану у розумінні Бете і Вейля*, ці результати становлять інтерес для розгляду надгустих астрофізичних об'єктів в околі фазових переходів.

### **Теоретичні розрахунки параметрів великомасштабної неоднорідності в моделях з ТМ і ТЕ**

В статтях авторів важливі результати отримано в напрямку *визначення параметрів космологічної моделі, спектра потужності початкових збурень густини* на основі порівнянь теорії зі спостережними даними щодо функцій мас скупчень галактик, пекулярних швидкостей галактик, просторового розподілу галактик і анізотропії реліктового випромінювання. Б. Новосядлим у піонерських роботах (задовго до загального визнання ТЕ) було показано, що кількісне узгодження теорії та спостережень досягається в моделях з ТМ та космологічною сталою. З метою встановлення типу ТМ проаналізовано формування початкового спектра потужності скалярних збурень густини в моделях ТМ з гарячою (активні нейтрино) та холодною (аксіони, слабо взаємодіючі масивні частинки) темною матерією. Запропоновано зручні аналітичні апроксимації для розрахунку спектра потужності в змішаних моделях, які використовувались іншими науковими

групами. Показано, що спостережуваний просторовий розподіл галактик, їх пекулярні швидкості та функції мас скупчень галактик пояснюються в моделях з вмістом нейтринної компоненти темної матерії, що не перевищує 10% від повної густини Всесвіту; також встановлено *верхню межу на масу спокою вироджених активних нейтрино*:  $<0.3$  eV на рівні достовірності 95%. Важливими є результати *розрахунку нелінійної стадії еволюції великомасштабних неоднорідностей густини*, отримані на основі розроблених авторами напіваналітичних методів. Показано, що передбачення моделей з відомим із спостережень вмістом ТМ, ТЕ та майже масштабно-інваріантним спектром початкових збурень узгоджуються із даними щодо функції мас скупчень галактик, спектра потужності контрасту густини на всіх масштабах та розподілом квазарів за червоними зміщеннями. Автори одними з перших пояснили потік галактик на Великий атрактор як наслідок великомасштабного піку збурення густини матерії, дослідили залежність рентгенівської світності міжгалактичного газу в його центральній області від амплітуди та характерного масштабу початкової неоднорідності, а також змоделювали вплив такої структури на анізотропію температури реліктового випромінювання. Отримано принципово важливий висновок, що тензорна мода в реалістичних моделях раннього Всесвіту може давати внесок тільки на великих кутових масштабах (сферичні гармоніки  $<10$ ) не більший 60% від основного внеску скалярної моди. Оголошене в березні 2014 року відкриття реліктових гравітаційних хвиль та підтвердження існування ранньої інфляційної стадії розширення Всесвіту в експерименті BICEP2 добре узгоджується з цим передбаченням: її внесок виявився рівним  $20 \pm 7\%$ . Результати авторів набувають першочергового значення в епоху становлення прецизійної космології, де важливим є розвиток методів спільного визначення параметрів космологічних моделей одночасно за сукупністю усіх наявних даних.

### **Великомасштабні розподіли матерії: методи і аналіз спостережень**

Фізичні та кінематичні характеристики матерії на масштабах груп і скупчень галактик є одними з головних джерел, що живлять космологічні теорії, дають експериментальну базу для визначення космологічних параметрів і тестування моделей ТМ і ТЕ. В цьому напрямку авторами опрацьовано великий обсяг спостережного матеріалу, чим створено надійний фундамент для порівняння з теоретичними розрахунками. Результати є важливими для подальших досліджень ТМ та визначення параметрів великомасштабної неоднорідності, вони вже знайшли широке використання в міжнародних програмах для картографування Місцевого Всесвіту.

Унікальним "матеріалом" для дослідження цих проблем є *карликові галактики низької поверхневої яскравості* (КГНПЯ), які складають найчисленнішу популяцію галактик у Всесвіті. Їх вважають ідеальними лабораторіями для дослідження процесів зореутворення в галактиках і проблеми темної матерії. Карликові галактики також важливі як "пробні частки" для вивчення структури Всесвіту на відстанях в декілька мегапарсек, походження та еволюції галактик. Роботи з пошуків та дослідження карликових галактик низької та екстремально низької поверхневої яскравості було вперше почато в роботах В. Караченцевої з 1968 року. В результаті пошуків карликових галактик на Першому Паломарському

огляді неба було знайдено близько 400 об'єктів, більша частина з яких не була каталогізована раніше. На основі оригінальних результатів та критичного аналізу відомих на 1986 р. спостережних даних створено реферативний *Каталог карликових галактик низької поверхневої яскравості* (1500 галактик), що охоплює все небо, розроблено схему морфологічної класифікації КГНПЯ.

Застосований І. Вавиловою до цього каталогу кластерний аналіз вперше дозволив отримати кількісні характеристики і показати принципову різницю у розподілах цих галактик з різним типом населення на масштабах скупчень галактик Діва і Піч та у обсязі Місцевого Надскупчення. Незалежні пошуки В. Караченцевої на оглядах неба POSS-II, ESO/SERC та SERC/EJ вперше виявили 327 нових карликових членів; на великих радіотелескопах проведено спостереження у лінії H I 21 см всіх кандидатів, отримано променеві швидкості, ширини лінії та потоки. Ці результати стали основою потужних міжнародних проектів з використанням Космічного телескопу Габбла, в яких, за участю В. Караченцевої, проведено спостереження КГНПЯ на відстанях до 10 Мпк та отримано фундаментальний результат – побудовано *тривимірну картину розподілу галактик Місцевого об'єму*.

На основі оригінальних спостережень та літературних даних в роботах В. Караченцевої створено *Каталог сусідніх галактик* (CNG), що охоплює все небо та містить 451 галактику Місцевого об'єму з оцінками променевих швидкостей, індивідуальних відстаней, оптичних та радіо-характеристик. Ці дані мають *принципове значення для відбору космологічних моделей, і широко використовуються для вивчення фізичних властивостей галактик*. Перший і на цей час широко визнаний як найбільш репрезентативний та повний *Каталог ізольованих галактик* (KIG) був створений на основі оригінального критерію відбору. Вперше була визначена каталожна частка *ізольованих галактик*, близько 4%, що накладає умови на процес формування великомасштабної структури. Ізольовані галактики є своєрідними еталонними об'єктами, оскільки не зазнавали динамічного впливу від сусідів протягом останніх 1-2 млрд. років і їхні властивості обумовлені власними процесами еволюції. На матеріалі *інфрачервоного огляду* 2MASS створено *новий каталог ізольованих галактик*, 2MIG, що містить 3227 об'єктів. Проаналізовано емпіричні співвідношення між основними характеристиками галактик каталогу 2MIG (морфологічні типи, інфрачервоні та оптичні величини, лінійні діаметри, водневі маси, швидкості обертання). Отримані залежності можуть бути використані для перевірки ієрархічної теорії утворення галактик шляхом численних зливань холодної темної матерії.

Зазначимо, що на цей час у світі існує лише три вибірки ізольованих галактик, що охоплюють все небо, до яких належать CNG (глибиною до 10 Мпк), новий каталог LOG (45 Мпк), та 2MIG (80 Мпк).

Авторами розроблено нові методи вивчення *великомасштабної структури та кластеризації* позагалактичних об'єктів з використанням фрактального та хвилькового аналізу, мозаїки Вороного. Зокрема, застосований в роботах І. Вавилової метод мозаїки Вороного дозволив виявити залежності між морфологічним типом, показником кольору та іншими параметрами галактик, що входять у групи різної кратності. Отримані відношення «маса-світність» галактик дозволили оцінити вміст ТМ у малочисельних групах (від 20 до 50  $M_{\text{СОН}}/L_{\text{СОН}}$  в

залежності від складу групи) та зробити висновок, що у групах, де переважають галактики пізніх типів, ТМ концентрується в гало групи. Розроблено новий метод оцінки кластеризації, який враховує ефекти спостережної селекції; цей метод виявився ефективним навіть при застосуванні до гетерогенних каталогів, що існували до появи широкомасштабних оглядів SDSS та 2dF. Пізніше метод був модифікований та застосований до різних випусків SDSS; в результаті отримано параметри кореляційних функцій квазарів на масштабах від 2 до 50 Мпк.

Одним з небагатьох засобів, що дає інформацію про будову найвіддаленіших об'єктів та розподіли маси у Всесвіті, є явище *гравітаційного лінзування*. Одним із засновників цього напрямку в Україні був А. Мінаков: його перша робота (1975, у співавторстві) на двадцять років випередила аналогічні роботи західних вчених. Піонерською була також перша в світі монографія (П.В. Бліох, А.О. Мінаков, 1989) з проблем гравітаційного лінзування. Цими та наступними дослідженнями було *створено основи теорії гравітаційного лінзування*, що базуються на досвіді харківської радіофізичної школи. Розвинуті підходи дозволили авторам одержати низку важливих результатів, зокрема, *дослідити структури критичних і каустичних кривих гравітаційно-лінзової системи (ГЛС), виконати аналіз варіацій блиску лінзованих зображень при критичних значеннях поверхневої густини маси макролінзи-галактики*.

Розроблено *нові наближені методи розв'язання рівняння лінзи в околі каустик*, які використані для моделювання кривих блиску в подіях з великим підсиленням у ГЛС Q2237+0305. Передбачено і детально досліджено виникнення нового ефекту, пов'язаного з лінзуванням змінного у часі джерела. Застосування теоретичних розробок до аналізу та інтерпретації результатів спостережень гравітаційно-лінзових систем (ГЛС) дозволило отримати *оцінку відносного вмісту темної матерії* у загальній масі дефлектора ГЛС Q2237+0305. Для цієї ж ГЛС отримано характеристики сумарного рентгенівського спектру. Новою є також верхня оцінка *для маси можливої субструктури темної матерії* в ГЛС PG1115+530.

В роботах В. Жданова з *астрометричного мікролінзування* вперше показано, що в позагалактичних ГЛС рухи зображень мікролінзованих квазарів можуть бути порівняними з власними рухами самих квазарів. У випадку стохастичної розрідженої системи мікролінз вперше знайдено *аналітичні співвідношення для розподілу ймовірностей рухів зображень*; завдяки простій кінцевій формі цей результат можна вважати хрестоматійним. В роботах авторів вперше звернуто увагу на те, що, окрім випадкового руху колективний рух зірок індукує *додатковий рух зображення* віддаленого джерела; це має принципове значення для побудови астрометричної системи відліку, що базується на віддалених джерелах. Також вперше, одночасно з іншими авторами, показано, що траєкторія центру яскравості зображення якісно змінюється при *врахуванні неточковості джерела*. Це відкриває додаткові можливості щодо вивчення структури джерела за необхідної точності астрометричних спостережень.

### **Хімічна еволюція галактик: нові методи і результати**

Як відомо, космологічний вміст баріонної матерії визначають зі спостережних даних щодо розподілу елементів, тобто хімічного складу. Саме на цій основі,

шляхом виключення, було отримано найбільш точні оцінки вмісту небаріонної компоненти, тобто ТМ. Таким чином, окрім важливої самостійної ролі, оцінки вмісту елементів непрямим чином пов'язані з вивченням ТМ. Дослідження хімічного складу об'єктів в галактиках дозволяє робити висновки про формування та еволюцію різних галактик. Цьому присвячені пріоритетні роботи Л. Пілюгіна, де розроблено *нові методи аналізу хімічного складу в галактиках, побудови моделей хімічної еволюції спіральних і неправильних галактик*.

В цих роботах запропоновано новий метод визначення хімічного складу (*вміст кисню та інших елементів*) в областях іонізованого водню (області HII). Показано, що точність визначення вмісту кисню новим методом не поступається класичному методу, а його перевагою є те, що він базується на інтенсивностях тільки сильних небулярних ліній, тоді як використання класичного методу вимагає вимірювання дуже слабкої авроральної лінії кисню. На основі нового методу перевизначено вміст кисню в гігантських спіральних галактиках і показано, що *вміст кисню у Всесвіті є в два-три рази нижчим, ніж приймалось раніше*.

Показано, що канонічна модель хімічної еволюції нашої Галактики не в змозі пояснити сучасні спостережувані дані. Побудовано *мультифрагментну модель хімічної еволюції Галактики*, яка дозволяє узгоджено пояснити спостережувані дані для гало та диску Галактики, чого не вдалося зробити в рамках канонічної моделі. *Розвинуто концепцію збагаченого галактичного вітру*, що містить залишки масивних зір, збагачені важкими елементами речовини, які утворюються під час спалахів наднових і залишають галактику, не змішуючись з міжзоряним середовищем. Вперше показано, що ефекти впливу звичайного галактичного вітру та збагаченого галактичного вітру на хімічну еволюцію галактик є принципово різними. Вперше показано, що моделі з урахуванням збагаченого галактичного вітру пояснюють відому залежність «світність – металічність» для карликових галактик, тоді як моделі зі звичайним галактичним вітром не пояснюють цієї залежності.

*Встановлено часову шкалу синтезу азоту у Всесвіті*. Знайдено, що вміст азоту в галактиці залежить від інтенсивності процесів зореутворення. Показано, що відношення вмісту азоту до вмісту кисню є індикатором часу, що пройшов від моменту формування основної частки зір галактики.

### **Числове моделювання комплексної еволюції галактичних систем**

Методи числового моделювання набувають сьогодні вагомого значення у розрахунках "з перших принципів" еволюції великомасштабної будови Всесвіту та її елементів, що дає можливість перевірки фундаментальних космологічних постулатів. Сучасні обчислювальні системи дозволяють не тільки ефективно обробляти великі масиви спостережних даних, але й моделювати складні астрофізичні системи з раніше недосяжною чисельною роздільною здатністю. У зв'язку з цим виняткової важливості набуває розробка ефективного програмного забезпечення, що дозволяє максимально використовувати доступні обчислювальні ресурси.

В роботах П. Берцика *вперше проведено аналіз 3D-газодинамічного колапсу тривісних протогалактичних фрагментів* методом гідродинаміки згладжених

частинок (SPH-метод). Розроблено чисельні моделі, які дозволяють у найбільш загальному вигляді описати *початковий процес формування галактичних структур*. Показано, що розроблений метод дозволяє самоузгоджено враховувати процеси формування зоряного компонента практично *незалежно від початкового розбиття газового компонента на фрагменти* (кількість SPH-частинок). Також вперше показано, що цей алгоритм дає можливість з достатньою точністю інтерпретувати результати, що отримані при досить помірних кількостях початкових SPH-частинок, і використати їх для всієї галактики, яка містить набагато більшу кількість газових фрагментів, ніж можна використовувати для модельних розрахунків.

Вперше використання «енергетичного критерію» ефективності зореутворення дозволило побудувати адекватну модель для *кількісного аналізу хемодинамічної еволюції нашої Галактики*. Запропонований газодинамічний код дозволив самоузгоджено описати як глобальну, так і локальну, у сонячному оточенні, динамічну і хімічну еволюції дискової галактики (із загальними параметрами, близькими до нашої Галактики). Чисельна модель, запропонована П. Берциком, вперше в рамках загальної самоузгодженої моделі описала глобальні динамічні та хімічні властивості диска. Саме комплексний розгляд газодинамічної еволюції та обміну речовиною між зорями та газовою фазою дозволили *вперше запропонувати адекватний механізм вирішення так званої «проблеми G-карликів»* у сонячному оточенні. Вперше показано, що різні газові компоненти галактик мають різну історію збагачення важкими елементами; проведено порівняння з сучасними спостереженнями карликових галактик.

Вперше, з використанням найсучасніших комп'ютерних технологій, проведені безпрецедентні (за кількістю частинок та часового відрізка інтегрування) роботи з високоточного динамічного *моделювання еволюції галактичного центру*, включно із рухом надмасивної чорної діри. Ці роботи дали змогу суттєво уточнити ранні аналітичні розрахунки «гравітаційного броунівського руху» чорної діри в розподілі поля зір і дати оцінки маси центрального невидимого тіла, що добре збігаються з прямими вимірами. Показано, що характерний час злиття чорних дір у центрі галактик при типових параметрах мас і кутових моментів орбіт чорних дір становить приблизно 1 мільярд років. Також вперше проведено *високоточне чисельне інтегрування еволюції подвійної чорної діри в центрі галактик* з використанням масивно-паралельного phi-GRAPE коду. Показано, що незалежно від кількості «зоряних» частинок ( $N$  – від 25 тис. до 1 млн.) похідна за часом величини, оберненої до великої півосі подвійної чорної діри (так званий "hardening gate"), не залежить від кількості зір.

Вперше проведено *розрахунки руху зоряних скупчень у гравітаційному комплексному потенціалі Галактичного диску* з максимально високою роздільною здатністю («одна зоря – одна частинка»), які показали, що видимі еліптичності спостережуваних зоряних скупчень добре узгоджуються з чисельним моделюванням. В роботах вперше детально досліджено динамічну еволюцію та енергетику втрати зір скупченнями за рахунок припливних сил у галактичному диску.



## **Фізика та еволюція маломасивних зір**

Зазначені у назві об'єкти є важливою складовою прихованої баріонної матерії. Нагадаємо, що наприкінці минулого століття однією з пріоритетних проблем було питання про роль компактних об'єктів (МАСНО) в структурі галактичного гало і претендентом на цю роль є саме маломасивні холодні зорі, зокрема, коричневі карлики. В подальшому було виявлено, що ці об'єкти, хоча й не дають основний масовий внесок в гало, є найчисленнішими зорями в Галактиці.

В піонерських роботах Я. Павленка з *дослідження спектрів ультрахолодних карликів та коричневих карликів* було показано можливість реалізації так званого «літієвого тесту» для визначення підмножини коричневих карликів серед маломасивних зір диску Галактики. Прямі спектральні спостереження області резонансного дублета літію вперше показали наявність лінії літію в атмосфері першого з відкритих коричневого карлика Teidel, навіть при наявності сильного поглинання випромінювання в смугах поглинання TiO. В роботах 1997-2008 рр. розроблено та реалізовано *методику розрахунків спектрів зір пізніх спектральних класів та коричневих карликів з врахуванням поглинання атомами та молекулами*. Це дало змогу визначити вміст літію в атмосфері Teidel та низки молодих коричневих карликів з розсіяних зоряних скупчень. Запропонована в цій роботі концепція «псевдоеквівалентних ширин» з успіхом продовжує застосовуватись і в наш час. Проведені дослідження процесів формування спектрів карликів спектрального класу L показали можливість застосування «літієвого тесту» для визначення субзоряної природи маломасивних L-карликів. Розроблено методику розрахунків профілів надсильних ліній поглинання натрію та калію, які домінують в оптичному діапазоні спектрів L-карликів. Запропоновано нову версію «дейтерієвого тесту».

Виконано піонерські дослідження з *вивчення формування ліній літію в атмосферах молодих маломасивних зір* диску Галактики та його гало з урахуванням відхилень від умов локальної термодинамічної рівноваги; отримані результати, зокрема, щодо вмісту літію в атмосферах класичних та слабких зір типу T Tau є класичними і зберігають актуальність до останнього часу. Вивчено природу рекурентних Нових зір і об'єктів з надшвидкою еволюцією та вперше отримано еволюційні характеристики для низки таких об'єктів.

### ***Нові пріоритетні результати, отримані з часу попереднього представлення роботи***

О. Жуком визначена фізична причина, чому деякі багатовимірні моделі Калуци-Клейна задовольняють гравітаційним експериментам, а інші - ні. Вперше показано, що варіація повного об'єму внутрішніх просторів генерує п'яту силу, що призводить до спотворення гравітаційної взаємодії. Абсолютно новим результатом є доказ відсутності калуца-клейнівських частинок в розглянутих моделях. Б. Новосядлим та В. Пелихом отримано нові результати про динамічні властивості фантомних скалярно-польових моделей темної енергії та встановлено, що найбільш оптимальне значення параметра рівняння стану скалярно-польових моделей темної енергії відповідає фантомній області. В разі підтвердження в подальших спостереженнях цей результат істотно змінить сучасні уявлення про

космологічну еволюцію. В роботах В. Караченцевої (з співавт.) отримано параметри залежностей Таллі-Фішера для ізольованих галактик з каталогу 2MIG, що має значення для розуміння еволюції великомасштабної структури. Оцінений вміст пари, груп та скупчення галактик у Місцевому всесвіті та їх характеристики, що можуть бути використані для порівняння різних сценаріїв походження великомасштабної структури. Вавиловою І. виконано аналіз мультихвильових властивостей 2MIG ізольованих галактик з активними ядрами (АЯГ) та отримано вперше оцінки мас чорних дір в їхніх центрах, які виявилися систематично меншими за маси чорних дір АЯГ, що містяться в групах і скупченнях галактик. В. Ждановим з співавторами розвинуто загальний метод аналізу гравітаційно-лінзового відображення в околі стійких особливостей, в тому числі, за наявності темної матерії. Вперше в рамках хвильової оптики отримано повністю аналітичний вираз для спектру потужності випромінювання гаусівського джерела, мікролінзованого точковою масою. Л. Пілюгіним запропоновано новий метод визначення вмісту кисню в областях іонізованого водню НII, для яких немає вимірювань лінії іонізованого кисню [OII] 3727. Це дозволяє, зокрема, досліджувати хімічний склад великої кількості областей НII в близьких галактиках на основі спектрів, в яких лінія [OII] 3727 лежить за межами спостережуваного спектрального інтервалу. У роботах Я. Павленка зі співавторами проведені дослідження детального хімічного складу зір диску Галактики, у тому числі зір з планетними системами.

У 2012 р. за темою роботи опубліковано 44 статті в журналах із загальним імпакт-фактором 127, 5 розділів у колективних монографіях і 4 – у збірниках праць. Підготовано 3 кандидата наук під керівництвом О. Жука, Л. Пілюгіна, В. Цветкової (перший керівник – А. Мінаков). Підготовлена монографія у 3-х томах “Dark Energy and Dark Matter in the Universe”: том 1 “Dark Energy: Observational Evidence and Theoretical models” (Novosyadlyj B.S., Pelykh V.I., Shtanov Yu.V., Zhuk A.I. Ed. V.M. Shulga. – К.: Akadempriodyka, 2013, 380 pp.); том 2 “Dark Matter: Astrophysical Aspects of Problem” (Shulga V.M., Zhdanov V.I., Berczik P.P., Pavlenko E.P., Pavlenko Ya.V., Pilyugin L.S., Tsvetkova V.S.) – у друці. Опубліковані монографії: “Ионизированный газ в галактиках: физическое состояние и химический состав” (Пілюгін Л.С. – К.: Наукова думка, 2013, 288 с.); “Загальна теорія відносності: горизонти випробувань” (Яцків Я.С., Александров О.М., Вавилова І.Б., Жданов В.І., Жук О.І., Кудря Ю.М., Парновський С.Л., Федорова О.В., Хміль С.В. – К.: ВАІТЕ, 2013, 264 с.). У 2013 р. авторами опубліковано 48 статей в реферованих журналах.

### **Висновки**

Отримані результати суттєво просувають наші знання про будову та еволюцію Всесвіту на галактичних та космологічних масштабах, створюють теоретичну і експериментальну основу для розуміння природи темної матерії і темної енергії. Основні здобутки авторського колективу, що мають пріоритетний характер, такі:

- *Створено нові теоретичні моделі глобальної будови Всесвіту з додатковими вимірами, знайдено нові класичні та квантові розв'язки, отримано спостережні обмеження на параметри цих моделей; запропоновано багатовимірні моделі виникнення ТМ і ТЕ.*

- Розроблено космологічні моделі з скалярним полем у ролі динамічної  $TE$  і вперше встановлено обмеження на параметри  $TM$ , які впливають із даних спостережень наднових типу Ia, великомасштабної структури Всесвіту та анізотропії температури реліктового випромінювання. На цій основі, задовго до публікації відомих результатів стосовно прискорення космологічного розширення, зроблено висновок про ненульове значення космологічної сталої.
- Розроблено принципові питання загальної теорії відносності, що мають значення для обґрунтування базових принципів стандартної моделі.
- Створено оригінальні каталоги галактик (карликових, ізольованих та ін.); на цій основі отримано якісні та кількісні характеристики локальної неоднорідності матерії на масштабах до 10 Мпк. Зазначені каталоги склали основу міжнародних програм спостережень з використанням космічного телескопу Габбла, вони широко використовуються в роботах інших авторів.
- Запропоновано нові підходи до аналізу кластеризації позагалактичних об'єктів, що дозволили отримати надійні дані про вміст  $TM$  у групах галактик.
- Одними з перших у світі розроблено послідовний теоретичний апарат гравітаційного лінзування; передбачено та досліджено нові фотометричні та астрометричні ефекти, що складають основу для оцінок розподілу маси в гравітаційно-лінзових системах.
- Запропоновано нові підходи до визначення хімічного складу в галактиках; показано, що вміст кисню у Всесвіті є в два-три рази нижчим, ніж вважалося раніше.
- Вперше побудовано мультифрагментну модель хімічної еволюції Галактики, яка пододала незгодженості старої (канонічної) моделі.
- Вперше розроблено самоузгоджену чисельну модель хемодинамічної еволюції галактики; проведено безпрецедентні за роздільною здатністю чисельні моделювання еволюції галактичного центру.
- Розроблено нову методику розрахунків спектрів зір пізніх спектральних класів та коричневих карликів; виконано пріоритетні дослідження по вивченню формування ліній літію в атмосферах молодих маломасивних зір, які складають найчисленну популяцію компактних об'єктів Галактики.

Результати досліджень **мають не тільки наукове, а й велике світоглядне значення**, оскільки стосуються найбільш фундаментальних питань на межі сучасних фізичних теорій, пов'язаних з існуванням та походженням Всесвіту. В першу чергу, отримані результати є важливими для **астрономії (космологія, космогонія)**; вони мають неабиякий інтерес для вирішення **проблеми небаріонної (темної) матерії і темної енергії**, яка є фундаментальною проблемою усього сучасного природознавства, оскільки саме ці складники домінують у навколишньому Всесвіті. Розроблені узагальнення космологічної моделі мають винятковий інтерес як полігон для перевірки **сучасних теорій фундаментальних взаємодій**. Розроблені авторами методи дослідження можуть бути використані в суміжних областях фізико-математичних наук.

Важливим наслідком поданої роботи є вагомий внесок у розвиток української школи з позагалактичної астрономії і космології, яка достойно представляє українську науку на міжнародній арені. Дослідження авторів

неодноразово підтримувались і підтримуються у рамках міжнародних програм і цільових наукових програм НАН України та проектів ДФФД України.

Авторський колектив зробив значний внесок у формування сучасних уявлень про структуру та еволюцію Всесвіту. Показниками цього внеску є 471 публікація та 4 бази даних, відібрані з понад тисячі робіт авторів з виконаних за більш ніж сорокарічний період. Список публікацій містить 5 монографій, 25 авторських розділів в колективних монографіях і 419 статей у реферованих виданнях, 13 – у збірниках наукових праць. Автори активно залучають свої напрацювання для підготовки молодих науковців, опубліковані 9 підручників та навчальних посібників використовуються в системі університетської освіти. Рівень досліджень і міжнародний авторитет авторської команди підтверджується публікаціями у провідних виданнях з найвищими імпаکت-факторами. Кількість посилань на роботи авторів складає понад 9500 (за міжнародними базами даних, що не охоплюють усі джерела), індекс Гірша (база даних SAO/NASA/ADS) = 44. За результатами роботи захищено 9 докторських та 25 кандидатських дисертацій.