

ДИНАМІКА ГАЛАКТИК І ПРОБЛЕМА ТЕМНОЇ МАТЕРІЇ

¹Вінницький національний технічний університет

Анотація:

У даній роботі було розглянуто динаміку галактик як ключ до розуміння природи темної матерії. Основну увагу приділено спостереженням обертальних кривих спіральних галактик, які вказують на наявність невидимої маси, що не взаємодіє з електромагнітним випромінюванням. Проаналізовано класичні та сучасні моделі розподілу маси в галактиках, а також різні гіпотези щодо природи темної матерії, включно з частинками WIMP, MACHO та модифікованою ньютонівською динамікою (MOND). Метою доповіді є узагальнення сучасних наукових підходів до вивчення темної матерії через динамічні властивості галактичних систем.

Ключові слова: темна матерія, динаміка галактик, обертальні криві, маса, WIMP, MACHO, MOND, гравітація.

Abstract:

This report examines galactic dynamics as a key to understanding the nature of dark matter. Special attention is paid to the observation of rotational curves of spiral galaxies, which indicate the presence of invisible mass that does not interact with electromagnetic radiation. The presentation analyzes both classical and modern models of mass distribution within galaxies, as well as various hypotheses regarding the nature of dark matter, including WIMPs, MACHOs, and Modified Newtonian Dynamics (MOND). The purpose of the report is to summarize current scientific approaches to studying dark matter through the dynamic properties of galactic systems.

Keywords: dark matter, galactic dynamics, rotation curves, mass, WIMP, MACHO, MOND, gravity.

Вступ

Однією з найважливіших загадок сучасної астрофізики є природа темної матерії — невидимої субстанції, що не випромінює, не поглинає й не відбиває електромагнітне випромінювання, проте чинить гравітаційний вплив на видиму матерію. Її існування було вперше запідозрено внаслідок аналізу динаміки галактик, зокрема їхніх обертальних кривих, які демонстрували аномалії, не сумісні з класичними законами ньютонівської механіки для спостережуваної кількості зоряної маси.

Дослідження поведінки зірок та газу в межах галактик показало, що для пояснення стабільності обертання необхідно враховувати додаткову масу, яка не фіксується жодними традиційними методами спостереження. Цей феномен став основою для формування гіпотези про темну матерію, яка сьогодні є фундаментальним компонентом сучасної космологічної моделі Всесвіту.

Метою даної доповіді є розгляд фізичних основ динаміки галактик, аналіз доказів існування темної матерії та огляд основних теоретичних моделей, що намагаються пояснити її природу. Окрема увага приділяється порівнянню альтернативних підходів, таких як модифіковані гравітаційні теорії, які ставлять під сумнів саму необхідність темної матерії.

Проблема темної матерії

Проблема темної матерії стала однією з центральних у сучасній астрофізиці завдяки астрономічним спостереженням, що суперечать класичним уявленням про гравітаційну взаємодію. Вперше на аномальну поведінку мас у Всесвіті звернув увагу швейцарський астроном Фріц Цвіккі ще у 1930-х роках. Досліджуючи скупчення галактик у сузір'ї Волосся Вероніки, він виявив, що світність галактик та їх червоне зміщення не узгоджуються з обчисленою масою системи. За його оцінками, видима маса була у 400–500 разів меншою за ту, яка необхідна для утримання скупчення від гравітаційного розсіювання. Це змусило вченого висунути припущення про існування «прихованої маси» — тобто речовини, яка не випромінює світла, але чинить гравітаційний вплив [1].

У подальші десятиліття ідею Цвіккі підтримали численні спостереження, зокрема аналіз обертальних кривих спіральних галактик. Згідно з класичною ньютонівською механікою, швидкість обертання зірок навколо центру галактики повинна спадати із відстанню від ядра (за аналогією із законами Кеплера в Сонячній системі). Проте астрономи, серед яких особливо вирізняється робота Віри Рубін у 1970-х роках, зафіксували, що швидкість обертання зірок залишається сталою навіть на великих відстанях від центру галактики. Це явище не можна пояснити лише присутністю видимої матерії — тому виникла гіпотеза про масивне гало з невидимої матерії, яка утримує галактику своєю гравітацією [2].

Окрім аналізу обертальних кривих, ще одним підтвердженням існування темної матерії стали ефекти гравітаційного лінзування. Це явище, передбачене загальною теорією відносності, полягає у викривленні світла далеких об'єктів під впливом масивних тіл. Спостереження таких лінз демонструють, що маса, яка викривляє світло, значно перевищує ту, яку можна пояснити лише видимою матерією. Зокрема, ефекти лінзування у скупченнях галактик підтверджують існування великої кількості невидимої маси [3].

Щодо природи темної матерії, наукова спільнота розглядає кілька можливих варіантів. Умовно всі гіпотези можна поділити на дві групи:

1. Баріонна темна матерія, що складається з компактних об'єктів — таких як коричневі карлики, нейтронні зорі, чорні діри тощо. Ці об'єкти отримали назву MACHOs (Massive Astrophysical Compact Halo Objects).
2. Небаріонна темна матерія, яка складається з гіпотетичних елементарних частинок. Серед них — нейтрино, аксіони, а найперспективнішими вважаються вімпи (WIMPs — Weakly Interacting Massive Particles). Ці частинки не взаємодіють з електромагнітним випромінюванням, мають масу та взаємодіють лише через слабку та гравітаційну сили [4].

Для виявлення темної матерії сучасна наука використовує широкий спектр експериментальних методів. Найбільш масштабними є такі напрями:

1. Астрофізичні спостереження за допомогою нейтринних та гамма-телескопів, таких як MAGIC, HESS, а також Байкальський підводний нейтринний телескоп. Ці інструменти фіксують високоенергетичні частинки, які можуть утворюватися внаслідок анігіляції або розпаду частинок темної матерії.
2. Прискорювальні експерименти, зокрема дослідження на Великому адронному колайдері (LHC) або раніше — на Tevatron. У таких експериментах намагаються створити умови, в яких можуть народитися частинки темної матерії, або виявити їх через дефіцит енергії у підсумкових продуктах зіткнень.
3. Непрямі пошуки з використанням надчутливих детекторів, розміщених у спеціально захищених середовищах, що знижують фонові сигнали. Наприклад, у рамках експериментів CoGeNT, XENON, LUX та ін., вчені реєструють іонізацію або теплові імпульси, спричинені взаємодією частинок темної матерії з ядрами речовини.

Значна частина гіпотез також виходить за межі Стандартної моделі фізики елементарних частинок, що робить пошук темної матерії не лише питанням космології, а й ключем до розширення меж фундаментальної фізики. У разі підтвердження її частинкової природи, можна очікувати відкриття нових класів елементарних частинок і, ймовірно, нових типів взаємодій.

Динаміка галактик

Динаміка галактик — це розділ астрофізики, що вивчає рух зір, газу, пилу та темної матерії в межах галактик під впливом гравітаційних сил. Цей напрямок науки допомагає зрозуміти, як галактики формуються, змінюються з часом, взаємодіють між собою та утримують свою структуру протягом мільярдів років [5].

Галактика — це гравітаційно зв'язана система, яка включає в себе зорі, зоряні скупчення, міжзоряний газ і пил, темну матерію, а часто і центральну надмасивну чорну діру. Серед основних типів галактик виділяються спіральні, еліптичні та нерегулярні. Наприклад, наш Чумацький Шлях є спіральною галактикою з вираженими рукавами, в яких зосереджено багато молодих зір [8].

Особливості динаміки галактик полягають у складності та унікальності гравітаційної взаємодії великої кількості об'єктів, які не рухаються як тверде тіло, а формують самогравітаційну систему, що

постійно змінюється у часі. Основу динаміку галактик становлять закони гравітації. У нашому випадку рух зір у галактиці визначається законом всесвітнього тяжіння Ньютона, де кожна зоря притягується до інших залежно від маси та відстані. Також враховується другий закон Ньютона, що зв'язує силу з масою та прискоренням, і закони Кеплера, які описують орбітальний рух тіл навколо центру мас. Проте через надзвичайно велику кількість зір у галактиці передбачити рух кожної окремої зорі складно. Тому астрофізики застосовують статичні методи та моделі, які дозволяють описувати динаміку у вигляді усереднених величин [5].

Однією з головних особливостей є те, що галактика не має єдиного центру мас, навколо якого все обертається, як це відбувається у Сонячній системі. Натомість кожна зоря рухається у змінному гравітаційному полі, яке утворюється всіма іншими зорями, газом й темною матерією. Через це орбіти зір є не замкненими, а часто хаотичними або періодичними, особливо у випадку еліптичних галактик [8].

Також динаміка галактик виявляє колективні явища, подібні до хвиль у рідині. Наприклад, у спіральних галактиках виникають спіральні щільні хвилі, які не є постійними структурами, а хвилями, через які проходять зорі та газ. Це пояснює існування стабільних спіральних рукавів, у яких часто спостерігаються інтенсивне зореутворення [6].

Одних з ключових відкриттів у динаміці галактик є вивчення ротаційних кривих спіральних галактик. Теоретично очікувалося, що швидкість обертання зір навколо центру галактики повинна зменшуватися з відстанню від центру, подібно до руху планет у Сонячній системі. Однак спостереження показали, що швидкість залишається майже сталою навіть на великих відстанях. Це стало серйозним доказом існування невидимої маси, яку назвали темною матерією [6].

Темна матерія-це гіпотетична форма матерії, яка не випромінює і не відбиває світло, а отже є невидимою в електромагнітному діапазоні. Водночас вона має масу і, відповідно, гравітаційно впливає на інші об'єкти. Її наявність пояснює стабільність галактик, а також характер ротаційних кривих, що не відповідає передбаченням класичної механіки для видимої маси. Темна матерія, як вважають, формує так зване гало - обширну сферичну оболонку навколо галактики, у якій міститься основна частина маси [5].

Для кількісного аналізу руху зір у галактиках використовують рівняння Джинкса — математичне співвідношення, яке поєднує гравітаційний потенціал галактики з розподілом зір, їхніми середніми швидкостями та швидкісним розсіюванням. Це рівняння дозволяє оцінити розподіл маси в галактиці, навіть якщо частина цієї маси є невидимою, як у випадку з темною матерією [8].

Таким чином, хоча основою динаміки галактик є класичні закони Ньютона і Кеплера, складність і масштабність цих систем вимагають застосування статистичних і обчислювальних підходів, що дозволяють досліджувати поведінку всієї галактики як єдиного гравітаційного зв'язаного утворення [8].

Галактики не існують у повній ізоляції. Вони можуть наближатись одна до одної, викривляти форму під дією гравітаційних приливних сил, зіштовхуватися або зливатися. Такі взаємодії часто супроводжуються сильними гравітаційними збуреннями, що призводять до утворення нових зір, перебудови структури галактики, а іноді й до повної зміни її морфологічного типу. Зіткнення галактик можуть спричиняти появу химерних форм, наприклад, кільцеподібних чи хвилястих структур, а самі галактики після злиття можуть стати еліптичними. А також відсутність зіткнень між зорями, попри їхню велику кількість. Середні відстані між зорями у галактиках настільки великі, що прямі зіткнення трапляються вкрай рідко. Водночас гравітаційна взаємодія між зірками, хоч і слабка для кожної пари окремо, в сукупності формує стабільну структуру галактики [6].

У сучасній науці динаміка галактик активно досліджується за допомогою комп'ютерного моделювання. Застосовуються чисельні симуляції, в яких мільйони частинок моделюють зорі, газ і темну матерію. Це дозволяє вивчати, як формуються галактики, як вони взаємодіють і еволюціонують протягом мільярдів років. Такі моделі підтверджують, що темна матерія є необхідною складовою для пояснення спостережувальних властивостей [7].

Висновок

Проблема темної матерії залишається однією з найглибших загадок сучасної астрофізики. Аналіз динаміки галактик-зокрема ротаційних кривих, ефектів гравітаційного лінзування та результатів комп'ютерного моделювання- переконливо свідчить про існування значної кількості невидимої маси. Ця маса не взаємодіє з електромагнітним випромінюванням, проте чинить потужний гравітаційний вплив.

У межах цієї роботи було розглянуто основні докази на користь існування темної матерії, серед яких- спостереження за обертанням спіральних галактик. Також було проаналізовано альтернативні пояснення, що включають як баріонні так і небаріонні гіпотези. Значну увагу приділено динаміці галактик — процесам, які визначають рух зір, газу, пилу й темної матерії в гравітаційному полі.

Виявлено, що класичні ньютонівські підходи не можуть пояснити стабільність та структуру галактик без введення додаткової невидимої маси. Темна матерія забезпечує збереження їхньої будови, пояснює постійну швидкість обертання зір та формування галактичних гало.

Сучасні експериментальні методи — астрофізичні спостереження, дослідження на прискорювачах та спроби прямого виявлення — активно шукають кандидати на частинки темної матерії, зокрема WIMPs та аксіони. Хоча її природа залишається невизначеною, наукова спільнота одностайно визнає темну матерії ключовим елементом космологічної моделі Всесвіту та перспективним напрямом для подальших досліджень, здатним розширити межі Стандартної моделі фізики.

Отже, вивчення темної матерії — це не лише спроба пояснити астрономічні спостереження, але й шлях до глибшого розуміння структури Всесвіту та фундаментальних законів природи. Динаміка галактик відкриває вікно у природу масових структур, їхню еволюцію та взаємодію. І хоча ми не можемо побачити темну матерію безпосередньо, її гравітаційна дія залишає виразний слід у русі зір і газу — а отже, і в самій архітектурі космосу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Zwicky F. Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln // *Helvetica Physica Acta*. — 1933. — Vol. 6. — P. 110–127. [Електронний ресурс],-Режим доступу: <https://adsabs.harvard.edu/full/1933AcHPh...6..110Z>
2. Rubin V. C., Ford W. K. Jr. Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions // *Astrophysical Journal*. — 1970. — Vol. 159. — P. 379. [Електронний ресурс],-Режим доступу: <https://adsabs.harvard.edu/full/1970ApJ...159..379R>
3. Tyson J. A., Wenk R. A., Valdes F. Detection of systematic gravitational lens galaxy image alignments // *Astrophysical Journal*. — 1990. — Vol. 349. — P. L1–L4. [Електронний ресурс],-Режим доступу: <https://adsabs.harvard.edu/full/1990ApJ...349L...1T>
4. Bertone G., Hooper D., Silk J. Particle dark matter: Evidence, candidates and constraints // *Physics Reports*. — 2005. — Vol. 405(5–6). — P. 279–390. [Електронний ресурс],-Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0370157304003515?via%3Dihub>
5. Бінні Дж., Тремейн С. Галактична динаміка. — К.: Наукова думка, 20.[Електронний ресурс],-Режим доступу:https://books.google.com.ua/books/about/Galactic_Dynamics.html?hl=ru&id=qxWt20TH--cC&redir_esc=y
6. Rubin, V.C., Ford, W.K. Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions. — *Astrophysical Journal*, 159:379 (1970). [Електронний ресурс],-Режим доступу:<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1970ApJ...159..379R/abstract>
7. Springel, V. et al. Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars. — *Nature*, 435, 629–636 (2005). [Електронний ресурс],-Режим доступу:<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2005Natur.435..629S/abstract>
8. Dark Matter, Rotation Curves, and the Morphology of Galaxies.[Електронний ресурс],-Режим доступу:https://www.academia.edu/81897019/Dark_Matter_Rotation_Curves_and_the_Morphology_of_Galaxies

Янківська Богдана Анатоліївна — студент групи 2КН-24б, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: bjankivska@gmail.com

Мількевич Діана Володимирівна — студент групи 4КН-24б, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: milkevic31@gmail.com

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир Валерійович** — доцент кафедри загальної фізики Вінницького національного технічного університету, Вінниця, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua

Yankivska Bohdana Anatoliivna — student of group 2CS-24b, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: bjankivska@gmail.com

Milkevych Diana Volodymyrivna — student of group 4CS-24b, Faculty of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: milkevic31@gmail.com

Academic supervisor: **Martyniuk Volodymyr Valeriiovych** — Associate Professor of the Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: martynyuk.v.v@vntu.edu.ua