



ШТАНОВ

Юрій Володимирович –
доктор фізико-математичних
наук, завідувач лабораторії
астрофізики і космології
Інституту теоретичної фізики
ім. М.М. Боголобова
НАН України

ТЕМНА МАТЕРІЯ У ВСЕСВІТІ: СУЧАСНИЙ СТАН І ПРОБЛЕМИ

**За матеріалами наукової доповіді на засіданні
Президії НАН України 23 вересня 2015 року**

Сукупність даних астрофізичних спостережень вказує на наявність у Всесвіті особливої субстанції, що проявляє себе лише своєю гравітацією. Ця невидима і прозора субстанція дістала назву темної матерії. Сучасна теорія еволюції Всесвіту узгоджується з даними спостережень лише за умови, що темна матерія складається з частинок досі невідомої природи. Дослідження властивостей і з'ясування природи темної матерії є одним із найактуальніших завдань фундаментальної фізики, астрофізики і космології. У цій доповіді ми розповімо, як науковці, у тому числі й в Україні, досліджують властивості темної матерії, які можуть пролити світло на природу цього явища.

Ключові слова: темна матерія, темна енергія, астрофізика, космологія, фізика елементарних частинок, теорія гравітації.

Вступ

Проблема складу і походження Всесвіту з давніх часів хвилювала допитливе людство. Численні й різноманітні космологічні гіпотези, що існували ще у другій половині ХХ ст., з накопиченням точної і об'ємної інформації за даними астрофізичних спостережень в останні десятиліття перетворилися на єдину теорію — так звану стандартну космологічну модель. Намагаючись дати найпростіше і найприродніше пояснення хімічного складу і структури Всесвіту, стандартна модель, яка ґрунтується на загальній теорії відносності Ейнштейна, не може обійтися без двох сутностей, незвичайних для навколосемної фізики. Це так звані темна матерія і темна енергія.

Темна енергія проявляє себе як властивість простору-часу, що робить його однорідно викривленим навіть за відсутності речовини. Вона, зокрема, впливає на темп розширення Всесвіту і спостерігається саме за таким впливом. Теоретично темну енергію можна охарактеризувати за допомогою так званої космологічної сталої Λ — особливої світової константи в теорії гравітації Ейнштейна. Хоча надзвичайно мала величина цієї

константи становить певну фізичну проблему, сама її наявність у теорії Ейнштейна є цілком природною; у цьому вона подібна до гравітаційної сталої або сталої швидкості світла.

Деяко інший теоретичний статус має темна матерія, якій власне і присвячена ця стаття. Подібно до темної енергії, вона також проявляється лише за викривленнями простору-часу. Проте ці викривлення вже не є однорідними у просторі-часі — вони виглядають так, начебто їх спричинює присутність деякої субстанції, що рухається подібно до речовини, з якої складаються зорі і планети, але яка є для нас і досі невидимою і цілком прозорою (звідси її назва «темна матерія»). Найбільш вражаючим є те, що для пояснення цих ефектів викривлення простору-часу необхідно припустити, що темної матерії загалом у Всесвіті в 5 разів більше, ніж звичайної. Природа темної матерії, якщо вона дійсно існує у Всесвіті, залишається невідомою і загадковою.

Звідки ж виникає необхідність гіпотези про наявність темної матерії у Всесвіті і як науковці намагаються з'ясувати її природу?

Видима і темна матерія у Всесвіті

Сучасна теорія гравітації, яка лежить в основі не лише космологічної моделі, а й узагалі фундаментальної фізики, — це загальна теорія відносності Ейнштейна. У цій теорії гравітаційна взаємодія описується як ефект викривлення геометрії простору-часу: матерія викривлює простір-час і сама ж рухається у викривленому просторі-часі. При цьому початково паралельні траєкторії світлових променів і небесних тіл згодом відхиляються одні від одних, що й сприймається як наявність поля тяжіння, або гравітації. Рівняння загальної теорії відносності має вигляд:

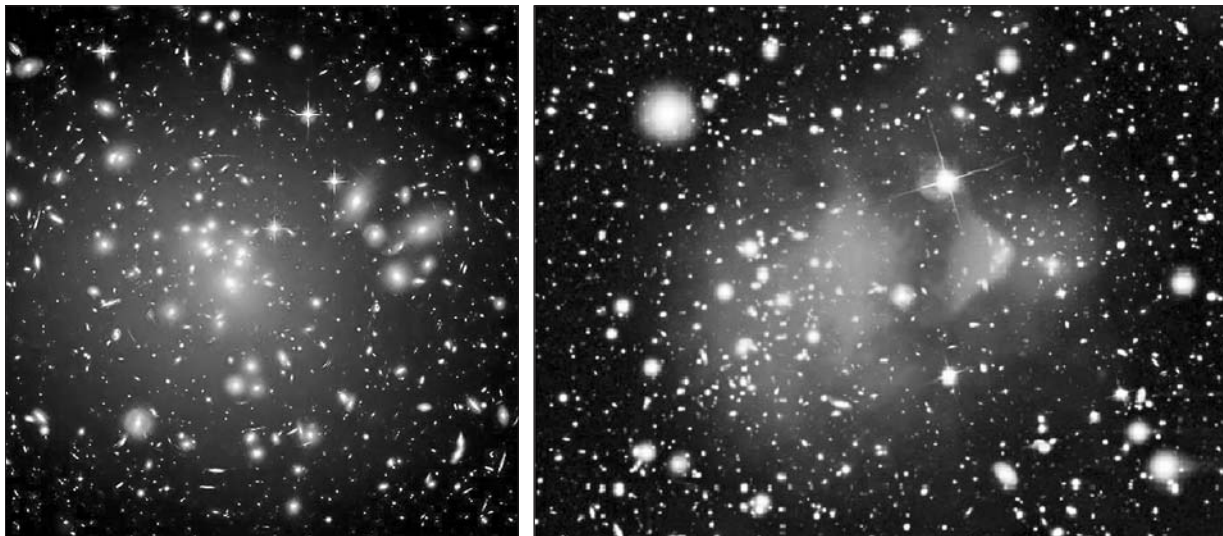
$$G_{\nu}^{\mu} = \Lambda \delta_{\nu}^{\mu} + \kappa T_{\nu}^{\mu},$$

де G_{ν}^{μ} — тензор Ейнштейна, що описує кривину простору-часу, T_{ν}^{μ} — тензор енергії-імпульсу матерії, κ — гравітаційна стала, а Λ — уже згадувана космологічна стала, що відповідає темній енергії. Це рівняння проголошує, що будь-яка

матерія викривляє геометрію простору-часу, або, з точки зору фізики, створює гравітаційне поле. У цьому ж гравітаційному полі матерія рухається. Спостерігаючи за рухом матерії (в тому числі світла), можна визначити створюване нею гравітаційне поле, або геометрію простору-часу.

Відома нам матерія бере участь не лише у гравітаційній взаємодії згідно з наведеним рівнянням, а й у інших взаємодіях. Так, вона випромінює і поглинає світло, завдяки чому і є для нас «видимою». Основна частина видимої матерії існує у формі галактик та міжгалактичного газу. Переважна більшість галактик зосереджені у галактичних скупченнях — гравітаційно зв'язаних галактичних системах. На рисунку ліворуч зображено одне з найбільш масивних галактичних скупчень у сузір'ї Діви. Окремі галактики — великі зоряні системи на зразок нашого Чумацького Шляху — видимі за допомогою телескопів у оптичному діапазоні, тоді як гарячий міжгалактичний газ (або плазма) випромінює у рентгенівському діапазоні і спостерігається за допомогою рентгенівських телескопів.

Саме у галактичних скупченнях американський астрофізик швейцарського походження Фріц Цвікі (Fritz Zwicky) у 1933 р. отримав одне з перших свідств існування невидимої матерії. Аналізуючи радіальні швидкості окремих галактик, одержані за допомогою ефекту Доплера у скупченні сузір'я Волосся Вероніки, він звернув увагу на одну дивовижну особливість. Галактики рухалися надто швидко одна відносно одної, що неможливо було пояснити лише їх власним тяжінням. Якщо вважати, що галактики утримуються в межах скупчення гравітаційним полем, то маса матерії, необхідна для створення такого поля, перевищує сукупну масу галактик у сотні разів [1]. На той час ще не було даних про точну кількість міжгалактичного газу у скупченнях, їх вдалося отримати лише в 1970-ті роки з появою рентгенівських космічних обсерваторій. Виявилось, що маса міжгалактичного газу перевищує сукупну масу галактик на порядок величини. Втім, навіть з урахуванням цієї маси, її вия-



На рисунку ліворуч наведено скупчення галактик Abell 1689 у сузір'ї Диви. Серпанок сірого кольору показує яскравість міжгалактичного газу в рентгенівському випромінюванні. Праворуч — так зване «кульове скупчення» (Bullet Cluster), що інтерпретують як результат зіткнення двох скупчень. Гарячий газ у результаті зіткнення залишився в центральній області, тоді як галактичні компоненти скупчень пролетіли одні крізь одних на зразок куль

виться недостатньо, щоб утримувати скупчення в рівновазі, зокрема сам гарячий газ.

Ф. Цвікі зробив два логічно можливі висновки зі свого спостереження. Або в галактиках і міжгалактичному просторі перебуває велика кількість непоміченої матерії, яка і створює необхідне для утримання скупчення гравітаційне поле, або теорія гравітації, на основі якої зроблено висновок про існування такої матерії, несправедлива на таких великих відстанях. У минулому обидві лінії міркувань приводили до успіху. Так, французький астроном Левер'є в 1846 р., аналізуючи аномалії в русі Урана на основі теорії гравітації Ньютона, передбачив існування нової планети. Обчисливши траєкторію невидимої планети, він досить точно вказав її положення, за яким німецький астроном Й.Г. Галле того ж року відкрив досі невідому планету, яку незабаром було названо Нептуном. З іншого боку, спроби пояснити аномалії в русі Меркурія припущенням про існування в околі Сонця прихованої маси, що своєю гравітацією впливає на його рух, лишалися безрезультатними, аж поки Ейнштейн не знайшов інше пояснення: теорія гравітації Ньютона не

зовсім точно справджується поблизу великих мас, де потрібно користуватися більш правильною і точною теорією — загальною теорією відносності. У подальшому ми торкнемося проблеми альтернативного пояснення описаних спостережень на основі модифікованої теорії гравітації.

Ще один спосіб визначення гравітаційного поля галактичних скупчень виник завдяки ефекту гравітаційної лінзи. Цей ефект полягає в тому, що, згідно із загальною теорією відносності Ейнштейна, світлові промені викривляються у гравітаційному полі подібно до того, як вони викривляються при проходженні крізь оптичну лінзу. Стосовно галактик та галактичних скупчень ці відхилення можуть спричинити появу подвійних зображень одного й того самого віддаленого об'єкта (галактики чи квазара), світло від якого проходить крізь гравітаційну лінзу, або спотворення форми цього об'єкта. Уперше таке подвійне зображення було спостережено в 1979 р., а вже протягом 1980-х років зафіксовано численні прояви спотворень форм далеких галактик на фоні масивних галактичних скупчень. Вони виглядали як про-

тяжні дуги з круговою схемою розташування навколо центру скупчення. Їх також можна помітити на фоні галактичного скупчення, зображеного на рисунку ліворуч. Теорія гравітаційного лінзування дозволяє отримати розподіл повної маси галактичного скупчення на основі цього ефекту. Висновок цілком узгоджується з результатами попередніх методів: галактичне скупчення містить велику кількість темної матерії.

Усі описані вище методи визначення маси галактичного скупчення спрацювали для дивовижного об'єкта — так званого кульового скупчення (Bullet Cluster), наведеного на рисунку праворуч. Спостережений у 2006 р. великою групою астрономів, він отримав інтерпретацію як результат майже лобового зіткнення двох галактичних скупчень на великій відносній швидкості. Галактичні компоненти обох скупчень пройшли одні крізь одних на зразок куль, тоді як газові компоненти завдяки взаємодії залишилися ближче до місця зіткнення. Маса газової компоненти більша за масу видимих галактик, однак гравітаційне лінзування цієї системи показує, що її сукупна маса зосереджена в просторовій області галактичних компонент. Це означає, що темна матерія обох скупчень також пройшла одна крізь одну практично без зіткнень і продовжує рух разом із галактиками [2].

Інше важливе свідчення наявності темної матерії надійшло з результатів аналізу кривих обертання спіральних галактик, тобто залежності швидкості обертання від відстані до галактичного центру. Ще в 1932 р. голландський астроном Ян Оорт (Jan Hendrik Oort), аналізуючи рух сусідніх зір, дійшов висновку, що в локальній галактичній площині має існувати більша кількість маси, ніж та, що спостерігається у вигляді яскравих зір [3]. Однак лише з появою і розвитком радіоастрономії швидкості обертання галактик вдалося вимірювати на великих відстанях від їхнього центру завдяки спостереженням доплерівського зсуву спектральної лінії нейтрального водню з довжиною хвилі 21 см. Уже перші спостереження, зроблені у 1950-ті роки, показали істотне відхилення

кривих обертання від передбачень закону Ньютона, що можна було пояснити наявністю значної кількості темної матерії навколо галактик. При цьому маса темної матерії всередині сфери, центрованої навколо галактики, повинна була зростати прямо пропорційно радіусу цієї сфери. Наявність такого «гало» темної матерії навколо спіральних галактик одночасно вирішувала проблему стійкості їх обертального руху. У 1970—1980-ті роки численні спостереження кривих обертання спіральних галактик у радіодіапазоні цілком підтвердили ці висновки.

Переконливі свідчення та найточніші дані про загальну кількість темної матерії у Всесвіті отримано в космології передусім зі спостережень анізотропії температури та поляризації мікрохвильового фонового випромінювання — реліктового випромінювання, що залишилося від «гарячої» стадії існування Всесвіту. Перші позитивні дані таких спостережень було одержано у 1990-х роках за допомогою космічної обсерваторії Cosmic Background Explorer (COBE), а потім, у XXI ст., вдосконалено космічними місіями Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) та Planck. Паралельно анізотропію температури та поляризацію реліктового випромінювання досліджували у численних наземних обсерваторіях та атмосферних експериментах на повітряних кулях. У 1998 р. було опубліковано результати найбільш точного визначення історії розширення Всесвіту за спостереженнями далеких наднових типу Ia; вони вперше надійно виявили існування темної енергії, або ненульової космологічної сталої. Усі ці спостереження разом із детальними визначеннями великомасштабної структури Всесвіту і привели до появи стандартної космологічної моделі — з космологічною сталою і темною матерією як необхідними складовими. Параметри цієї космологічної моделі зараз визначаються з високою точністю, що дає привід говорити про настання ери прецизійної космології.

Реліктове випромінювання містить дуже важливу інформацію про стан Всесвіту в епоху рекомбінації водню, коли температура кос-

мічного газу становила близько 3000 K, а вік Всесвіту — близько 400 тис. років. Це найвіддаленіші у просторі й часі події, які можна спостерігати за допомогою світла. Спостереження реліктового випромінювання свідчать про високу однорідність та ізотропію Всесвіту в цю епоху: просторові неоднорідності густини первісного водню ρ у той час становили відносну величину на рівні $\delta\rho/\rho \sim 10^{-5}$. У космологічній моделі, заснованій на загальній теорії відносності, неоднорідності густини зростають з часом за законом $\delta\rho/\rho \sim t^{2/3}$. У разі відсутності іншої матерії у Всесвіті, в нинішню епоху, коли вік Всесвіту становить уже близько 14 млрд років, ми мали б $\delta\rho/\rho \sim 10^{-2}$. Такі малі значення просторової неоднорідності абсолютно несумісні з існуванням багатого великомасштабної структури, яку ми спостерігаємо у вигляді галактик і галактичних скупчень. Вихід із цього становища полягає у припущенні про існування темної матерії, яка не взаємодіє зі світлом і зі звичайною матерією інакше, ніж за допомогою гравітації, і неоднорідності густини якої в епоху рекомбінації значно вищі за неоднорідності густини звичайної матерії. Космологічні міркування є не лише одним із найбільш сильних свідочств на користь існування темної матерії, а й свідченням того, що вона є матерією небаріонної природи (тобто не складається з нейтронів і протонів). Це також цілком узгоджується з теорією космологічного нуклеосинтезу (синтезу ядер гелію та легких елементів), яка, разом з результатами визначення хімічного складу первісного космічного газу за даними спостережень, обмежує кількість баріонів (нейтронів і протонів) у Всесвіті.

Наведені вище якісні міркування підтверджуються ретельними обчисленнями в рамках стандартної космологічної моделі і порівнянням її передбачень зі спостережуваними даними. Якщо підсумувати все вищесказане, виникає така картина: близько 5/6 маси у Всесвіті припадає на субстанцію невідомої природи — темну матерію. Вона виявляє себе лише за гравітаційним впливом на видиму матерію і на світло, утворюючи масивні гало, в які занурені

галактики і галактичні скупчення. Історію відкриттів, що привели до появи цієї концепції, детальніше викладено у книзі [4].

Якщо прийняти описану вище модель Всесвіту, виникає питання про можливу природу темної матерії. Розглянемо його в наступному розділі.

Природа темної матерії

Найпростіша і найпоширеніша гіпотеза, яка пояснює ефект темної матерії, припускає, що Всесвіт заповнений масивними частинками реліктового походження, які й складають темну матерію. Серед реліктів гарячого раннього Всесвіту ми вже згадували мікрохвильове фонове випромінювання (фотони), яке теоретично було передбачене нашим співвітчизником Георгієм Гамовим ще в 1948 р., а відкрите у 1965 р. Реліктове випромінювання має тепловий рівноважний спектр, температура якого на сьогодні становить приблизно 2,7 K. Це означає, що в 1 см³ міститься близько 410 реліктових фотонів з характерними довжинами хвиль близько 2 мм.

Іншими реліктовими частинками, передбаченими стандартною космологічною моделлю, є нейтрино. Вони відокремлюються від первісної плазми набагато раніше за фотони і на сьогодні мають характерну температуру близько 2 K. Нині нам відомо три типи нейтрино: електронне, мюонне і тау-нейтрино. В середньому у Всесвіті в 1 см³ налічується приблизно 110 нейтрино і антинейтрино кожного типу. Реліктові нейтрино ще не виявлено експериментально; це дуже складно зробити через їх надзвичайно низьку енергію. Проте в їх існуванні немає жодних сумнівів, зважаючи на успіхи стандартної моделі гарячого Всесвіту. Нейтрино — нейтральні стабільні частинки, що беруть участь лише в слабкій та гравітаційній взаємодіях. Маса цих частинок настільки мала, що навіть на сьогодні прями обмеження на її величину є лише зверху. Втім, наприкінці 1990-х років було відкрито явище нейтринних осциляцій — перетворень нейтрино з одного типу на інший у процесі їх розповсюдження

у просторі¹. Це означає, що принаймні два з трьох типів нейтрино повинні мати ненульову масу. У такому разі нейтрино можуть становити частину невидимої матерії Всесвіту. Проте, з огляду на малу масу нейтрино, ця частка дуже мала — за сучасними оцінками, вона становить не більш як 2% від повної прихованої маси. Отже, для реалізації гіпотези реліктових частинок темної матерії необхідно шукати іншого кандидата. Серед відомих нам частинок так званої стандартної моделі електрослабкої взаємодії такого кандидата немає. Це означає, що стандартна модель елементарних частинок потребує свого розширення.

Елементарні ферміони — частинки спіну $1/2$, які входять до стандартної моделі і з яких складається вся спостережувана матерія, — це шість кварків (беруть участь у всіх фундаментальних взаємодіях) і шість лептонів (не беруть участі у сильних взаємодіях). Три з шести лептонів електрично заряджені — електрон, мюон і тау-лептон, а три інші — електрично нейтральні нейтрино, які ми вже згадували. Ці частинки взаємодіють між собою за допомогою векторних бозонів, як безмасових (глюони і фотон), так і масивних (W - і Z -бозони). Виняткова роль належить скалярному бозону Хіггса, нещодавно відкритому на Великому адронному колайдері в ЦЕРНі.

Особливість ферміонного складу стандартної моделі полягає в тому, що нейтрино присутні в ній лише половиною станів порівняно з іншими частинками. Дещо спрощуючи картину, можна сказати, що у звичайних реакціях нейтрино народжуються лише зі спіном, напрямленим протилежно їх імпульсу (ліва поляризація), а антинейтрино — зі спіном, напрямленим уздовж імпульсу (права поляризація). Праві нейтрино і ліві антинейтрино в природі досі не спостерігалися. Проте це не означає, що таких станів нейтрино зовсім немає — просто ймовірність їх народження у слабкій вза-

ємодії може бути дуже малою (слабка взаємодія порушує дзеркальну симетрію у природі). Відкриття явища нейтринних осциляцій, про яке згадувалося вище, свідчить про наявність у нейтрино маси і означає, що праві нейтрино (і, відповідно, ліві антинейтрино) також мають існувати в природі. Розширення стандартної моделі елементарних частинок за допомогою правих нейтрино є одним із найпростіших і найприродніших її узагальнень. Виявляється, що на цьому шляху можна отримати кандидата на частинку темної матерії. Дійсно, найбільш загальна структура мас для нейтрино, що включає маси як діраківського, так і майоранівського типу, приводить до існування трьох легких нейтрино, які можуть бути асоційовані з нейтрино, що ми спостерігаємо в експерименті, і трьох важких нейтрино. Найлегше з останніх, так званих стерильних, нейтрино і може відігравати роль частинки темної матерії [6]. Цікаво, що цю модель можна використати також для пояснення баріонної асиметрії Всесвіту, тобто того факту, що спостережувана частина Всесвіту не містить скільки-небудь значної кількості антиречовини.

Крім описаного найпростішого узагальнення стандартної моделі елементарних частинок, є багато інших її розширень, які вирішують ті чи інші проблеми власне фізики елементарних частинок і квантової теорії поля. Як правило, такі розширення містять і кандидата на роль частинки темної матерії. Можна навіть сказати, що наявність такого кандидата є одним із критеріїв вірогідності того чи іншого варіанта розширення. Серед таких моделей можна відзначити, передусім, суперсиметричні розширення². Суперсиметрія використовується для вирішення проблеми «природності», або «ієрархії» масових параметрів фізики елементарних частинок, а також проблем, пов'язаних з теорією об'єднання взаємодій. З-поміж так званих суперпартнерів відомих нам елементарних частинок існує принаймні одна ста-

¹ Під час написання цієї статті, 5 жовтня 2015 р., за відкриття нейтринних осциляцій було присуджено Нобелівську премію японцю Такаакі Кадзіта (Takaaki Kajita) і канадцю Артуру Макдональду (Arthur Bruce McDonald) [5].

² До речі, одними з відкривачів суперсиметрії на початку 1970-х років були харківські фізики Дмитро Волков і Володимир Акулов.

більша частинка, яка може виступати кандидатом на роль частинки темної матерії. Кандидатом іншої природи є гіпотетична нейтральна частинка аксіон, яку було запропоновано для вирішення проблеми відсутності порушення симетрії комбінованої парності у сильних взаємодіях. Цілий клас гіпотетичних частинок темної матерії об'єднується під назвою слабозвзаємодіючих масивних частинок (Weakly Interacting Massive Particles — WIMP). Особливість цього класу кандидатів полягає в тому, що вони є тепловими реліктами раннього Всесвіту з перерізом анігіляції, характерним для слабкої взаємодії. Кандидати на роль частинок темної матерії виникають у моделях з додатковими вимірами простору, а також у багатьох інших моделях фізики частинок. За відсутності прямих сигналів від темної матерії неможливо зробити однозначний вибір на користь однієї з цих численних можливостей; це справа поточних і майбутніх експериментів та спостережень [7].

Особливий тип темної матерії — так звані масивні компактні об'єкти гало (Massive Compact Halo Objects — MACHO), тобто космічні тіла великої маси, такі як коричневі карлики, планети або чорні діри. Інтенсивний пошук таких об'єктів проводять за допомогою ефекту гравітаційного мікролінзування, тобто зміни яскравості фонові зорі або квазара, якщо спрямований на неї промінь зору перетинається таким масивним об'єктом. Результати пошуку не виявили об'єктів такого типу у кількості, достатній для пояснення явища темної матерії [7].

Пошуки темної матерії

Перед дослідниками темної матерії стоять два безпосередніх завдання. По-перше, потрібно створити якомога детальнішу картину розподілу темної матерії у Всесвіті. Це, зокрема, дозволить пролити світло на характер хаотичного («теплого») руху частинок темної матерії — більш повільний рух частинок темної матерії відносить її до класу «холодної», а більш швидкий — до класу «теплої» темної матерії.

По-друге, потрібно намагатися зареєструвати частинки темної матерії за їх негравітаційними взаємодіями.

Перше завдання, тобто встановлення розподілу темної матерії, вирішується кількома методами, описаними вище. На найбільш ранніх етапах еволюції Всесвіту інформація про розподіл темної матерії надходить від анізотропії температури і поляризації реліктового випромінювання. Спостереження видимої матерії Всесвіту, і особливо її динаміки, тобто поля швидкостей, за допомогою оптичних, інфрачервоних та радіотелескопів дає інформацію про розподіл і динаміку темної матерії на різних просторових масштабах і в різних об'єктах (галактиках, скупченнях галактик тощо). Рентгенівські спостереження гарячого газу в скупченнях галактик з використанням умови газодинамічної рівноваги дають змогу визначити профілі гравітаційного потенціалу, а отже, і профілі розподілу темної матерії в скупченнях. Метод гравітаційного лінзування, як сильного, так і слабого, також дозволяє отримувати профілі розподілу маси галактичних скупчень. Криві обертання спіральних галактик та профілі розподілу швидкостей в еліптичних галактиках дають змогу одержати відповідні профілі гравітаційного поля, а отже, і темної матерії. Картину розподілу темної матерії, отриману за даними спостережень, порівнюють з результатами чисельних моделювань процесів утворення відповідних структур. На цьому шляху одержують важливу інформацію про первісний просторовий розподіл темної матерії та характер теплового руху її складових частинок (більш повільний чи більш швидкий). Усе це має безпосереднє значення для теорії утворення галактик, галактичних скупчень та великомасштабної структури Всесвіту.

Друге завдання, тобто реєстрацію частинок темної матерії за їх негравітаційними проявами, проводять методами прямого та непрямого пошуку [7]. Прямий пошук ґрунтується на можливому розсіянні частинок темної матерії, що утворюють гало нашої галактики, на частинках звичайної речовини. З метою ізоляції від стороннього фону відповідні експерименти

зазвичай проводять у підземних лабораторіях, найвідоміші з яких — Гран Сассо (Gran Sasso) в Італії, Сенфорд (Sanford) у Південній Дакоті, Судан (Soudan) у Міссурі. Пошук відбувається за допомогою сигналів трьох типів: утворення фононів у криогенних калориметрах, сцинтиляції (фотони) та іонізації (електрони). На сьогодні серед більш ніж двох десятків експериментів такого типу лише три виявили свідчення про темну матерію: експеримент DAMA/LIBRA у Гран Сассо, експеримент CoGeNT у Судані та експеримент CDMS-II у лабораторії SNOLAB у Канаді [7]. Проте ці результати суперечать іншим експериментам, які не спостерігають частинки темної матерії і дають лише верхні обмеження на їх параметри, що не дозволяє стверджувати про реєстрацію частинок темної матерії в експериментах цього типу.

Ще один метод прямого пошуку частинок темної матерії полягає в їх народженні при зіткненнях відомих нам частинок на колайдерах, таких як Великий адронний колайдер у ЦЕРНі. Поки що у жодному з таких експериментів не спостережено суттєвих відхилень від передбачень стандартної моделі елементарних частинок, зокрема, не видно наявності нових частинок.

Непрямий пошук темної матерії оснований на можливості анігіляції та розпаду частинок темної матерії в гало галактик і галактичних скупчень. При цьому енергія вторинних частинок — результатів розпаду та анігіляції — може досягати маси частинок темної матерії, яка варіюється в межах від кількох кілоелектрон-вольт до сотень гігаелектрон-вольт. Утворені в процесі анігіляції частинок темної матерії електрони і позитрони можуть у свою чергу анігілювати з утворенням фотонної лінії 511 кеВ або породжувати синхротронне випромінювання у магнітних полях, яке можна спостерігати у радіодіапазоні. Тому для прямого пошуку темної матерії використовують детектори космічних променів і γ -променів, а також радіо- та нейтринні телескопи.

Інтенсивність розпаду темної матерії прямо пропорційна її густині, а інтенсивність анігіля-

ції прямо пропорційна квадрату густини. Тому непрямі методи пошуку чутливіші до просторового розподілу темної матерії в гало космічних об'єктів і можуть використовувати ці залежності для більш певного пошуку корисного сигналу.

Один нещодавно отриманий результат прямого пошуку темної матерії привертає до себе особливу увагу. Аналіз спектрів рентгєнівського випромінювання з боку галактики Андромеди та галактичного скупчення в сузір'ї Персея [8] і аналіз сукупного випромінювання від ряду галактичних скупчень [9] незалежно один від одного виявили наявність лінії випромінювання на енергії близько 3,5 кеВ, що не очікувалася як лінія випромінювання гарячої астрофізичної плазми. Ця лінія випромінювання може бути інтерпретована як лінія розпаду стерильного нейтрино з масою близько 7 кеВ. На час написання цієї статті походження зазначеної лінії є предметом дебатів і ретельних перевірок [10, 11].

Незрозуміле збільшення частки позитронів порівняно з електронами в космічних променях зі зростанням їх енергії також розглядають як один із можливих проявів розпаду темної матерії [7]. Для ретельної перевірки гіпотез такого роду можуть використовуватися як космічні гамма-обсерваторії й детектори, так і наземні детектори γ -променів, такі як Високоенергетична стереоскопічна система (High Energy Stereoscopic System — H.E.S.S.) черенковських телескопів та її наступник — Масив черенковських телескопів (Cherenkov Telescope Array — CTA), що вже споруджується [12]. При цьому результати прямих і непрямих методів пошуку темної матерії можуть бути скомбіновані для встановлення спільних обмежень на параметри частинок темної матерії.

Темна матерія чи модифікована гравітація?

Як зазначалося вище, висновок про наявність темної матерії повністю спирається на припущення про справедливість теорії гравітації Ейнштейна на всіх просторових масштабах.

Однак це припущення недоступне для прямої експериментальної перевірки, адже в астрофізиці і космології йдеться про гігантські відстані. Виникає цілком слушне запитання: чи не може ефект «темної матерії» бути проявом модифікованої гравітації?

Одним із піонерів цього напрямку був ізраїльський фізик Мордехай Мільгром (Mordehai Milgrom), який у 1983 р. запропонував теорію модифікованої ньютонівської динаміки (Modified Newtonian Dynamics — MOND) для пояснення явищ прихованої маси в галактиках [13]. Зроблене ним важливе спостереження полягало в тому, що необхідність у прихованій масі виникає для динамічних систем, у яких прискорення гравітуючих елементів (таких як зорі у галактиці) досягає вкрай малої величини — $a_0 \approx 2 \cdot 10^{-8} \text{ см/с}^2$. Якщо припустити, що для менших значень прискорення гравітаційна сила стає пропорційною не самому прискоренню (згідно із законом Ньютона), а його квадрату, то криві обертання галактик можливо пояснити без гіпотези темної матерії. Більше того, ця теорія передбачила деякі закономірності, які поки що не вдається пояснити в рамках парадигми темної матерії. Серед таких закономірностей — баріонне співвідношення Таллі—Фішера $M_b = Av^4$, де M_b — маса звичайної (баріонної) речовини в галактиці, v — гранична швидкість її кривої обертання, а A — деяка стала. Успіх пояснення динаміки різноманітних галактик із залученням однієї універсальної сталої привертає увагу до цієї теорії. Проте, пояснюючи динамічні властивості галактик на основі модифікованої гравітації без гіпотези темної матерії, ця теорія не змогла так само пояснити динамічні властивості галактичних скупчень. Іншою проблемою теорії є її нерелятивістський характер. Спроби узагальнити теорію до релятивістської моделі і обійтися без залучення темної матерії поки що не мають помітного успіху.

Отже, теорії модифікованої гравітації на сьогодні здатні пояснити в кращому випадку лише обмежене коло явищ, пов'язаних з темною матерією [14–16], і гіпотеза про існування темної матерії у вигляді реліктових частинок домінує

в науковому світі. Втім, зроблені прихильниками теорії модифікованої гравітації спостереження, зокрема встановлення «універсальної» сталої прискорення a_0 в динаміці галактик, є дуже важливими і для гіпотези темної матерії і ще чекають свого пояснення.

Дослідження в Україні

Українські вчені беруть активну участь у дослідженні природи темної матерії, як самостійно, так і у складі міжнародних колаборацій. Один із значущих результатів, про які йшлося вище, — відкриття лінії випромінювання на енергії близько 3,5 кеВ, що є можливим проявом розпаду темної матерії, отримано за участю співробітників Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України [8–11]. Теорію стерильних нейтрино досліджують в Інституті теоретичної фізики та Київському національному університеті імені Тараса Шевченка. Встановлення просторового розподілу темної матерії за допомогою швидкісного поля галактик проводять в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка, де також розробляють і використовують методи гравітаційного лінзування. Ці методи розробляють і в Радіоастрономічному інституті НАН України. Профілі гало темної матерії за результатами рентгенівських спостережень міжгалактичного газу вивчають співробітники Головної астрономічної обсерваторії НАН України, де також здійснюють комп'ютерні N -частинкові моделювання процесів формування гало темної матерії та галактик. Теоретичні дослідження космологічної еволюції темної матерії і темної енергії активно проводять в Астрономічній обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка. В Інституті теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України розробляють також гіпотези про альтернативу темної матерії на основі модифікованої гравітації, у тому числі в моделях з додатковими просторовими вимірами. В Одеському національному університеті ім. І.І. Мечникова досліджуються кандидати на роль темної матерії,

що виникають у багатовимірних теоріях. У Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» вивчають моделі взаємодійних темної матерії і темної енергії. Три українські наукові установи — Астрономічні обсерваторії Київського та Львівського національних університетів, а також Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України — є учасниками згаданого міжнародного проекту Масив черенковських телескопів [12], одним із завдань якого стане непрямий пошук темної матерії шляхом спостережень космічних променів.

Протягом 2007—2012 рр. наукова діяльність з дослідження властивостей і природи темної матерії і темної енергії координувалася в Україні в рамках цільових комплексних програм наукових досліджень НАН України «Дослідження структури та складу Всесвіту, прихованої маси і темної енергії» (Космомікрофізика) та «Астрофізичні і космологічні проблеми прихованої маси і темної енергії Всесвіту» (Космомікрофізика-2). Результати українських науковців висвітлено в тритомній монографії [17—19].

Висновки

Явище прихованої маси надійно встановлено за сукупністю даних астрофізичних і космологічних спостережень і є однією з найбільших загадок сучасної фізики. За найвірогіднішою гіпотезою, воно пов'язане з наявністю у Всесвіті невидимої і прозорої субстанції — темної матерії, що проявляється лише завдяки її гравітаційній дії. Жодна з відомих на сьогодні елементарних частинок не може бути залучена для пояснення спостережуваних властивостей темної матерії, що вказує на необхідність розширення стандартної моделі фізики елементарних частинок. Менш імовірна, але не виключена альтернативна можливість полягає в модифікації законів гравітаційної взаємодії на великих просторових масштабах.

Є два принципові способи виявлення існування частинок темної матерії — за допомогою наземних/підземних експериментів (прямий метод) та космічних спостережень (непрямий метод). Прямий метод використовують у кількох міжнародних експериментах, у яких здійснюється пошук досі невідомих частинок, що народжуються при зіткненнях елементів звичайної речовини (одне з наукових завдань Великого адронного колайдера в ЦЕРНі), або реєстрація пружних зіткнень частинок космічної темної матерії з частинками звичайної речовини (підземні лабораторії). Для непрямого пошуку темної матерії використовують детектори космічних променів і γ -променів, а також радіо- та нейтринні телескопи, за допомогою яких здійснюють пошук продуктів розпаду та анігіляції частинок темної матерії в космосі.

Рік тому науковці Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України у співпраці з європейськими вченими виявили нову лінію рентгенівського електромагнітного випромінювання від галактики Андромеди і галактичного скупчення Персея [8]. Одночасно наявність такої лінії було незалежно підтверджено в ряді галактичних скупчень іноземною групою дослідників [9]. Знайдена на енергії близько 3,5 кеВ лінія випромінювання може інтерпретуватися як кандидат на сигнал від розпаду темної матерії. Вірогідними кандидатами у такі частинки є стерильні нейтрино. Українські вчені та іноземні наукові групи проводять додаткові дослідження з метою підтвердження наявності цієї лінії в астрофізичних об'єктах з великим вмістом темної матерії та уточнення її фізичного походження [10, 11]. Результати цих досліджень очікуються вже найближчим часом.

Незважаючи на досягнуті за останні роки науковцями всього світу значні успіхи у вивченні властивостей темної матерії, проблема її фізичної природи далека від свого вирішення, і на цьому шляху нас можуть чекати нові несподівані відкриття.

REFERENCES

1. Zwicky F. Der Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln. *Act. Helv. Phys.* 1933. **6**: 110.
2. Clowe D., Bradač M., Gonzalez A.H., Markevitch M., Randall S.W., Jones C., Zaritsky D. A direct empirical proof of the existence of dark matter. *Astrophys. J.* 2006. **648**(2): L109.
3. Oort J.H. The force exerted by the stellar system in the direction perpendicular to the galactic plane and some related problems. *Bull. Astron. Inst. Neth.* 1932. **6**: 289.
4. Sanders R.H. *The Dark Matter Problem: A Historical Perspective*. (Cambridge: Cambridge University Press, 2010).
5. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2015/press.html.
6. Abazajian K.N. et al. Light sterile neutrinos: a white paper. arXiv:1204.5379 [hep-ph].
7. Klasen M., Pohl M., Sigl G. Indirect and direct search for dark matter. *Prog. Part. Nucl. Phys.* 2015. **85**: 1.
8. Boyarsky A., Ruchayskiy O., Iakubovskiy D., Franse J. Unidentified line in X-ray spectra of the Andromeda galaxy and Perseus galaxy cluster. *Phys. Rev. Lett.* 2014. **113**(25): 251301.
9. Bulbul E., Markevitch M., Foster A., Smith R.K., Loewenstein M., Randall S.W. Detection of an unidentified emission line in the stacked X-ray spectrum of galaxy clusters. *Astrophys. J.* 2014. **789**(1): 13.
10. Iakubovskiy D., Bulbul E., Foster A.R., Savchenko D., Sadova V. Testing the origin of ~3.55 keV line in individual galaxy clusters observed with XMM-Newton. arXiv:1508.05186 [astro-ph.HE].
11. Iakubovskiy D. Observation of the new line at ~3.55 keV in X-ray spectra of galaxies and galaxy clusters. arXiv:1510.00358 [astro-ph.HE].
12. <https://portal.cta-observatory.org/Pages/Home.aspx>.
13. Milgrom M. A modification of Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden matter hypothesis. *Astrophys. J.* 1983. **270**: 365.
14. Pal S., Bharadwaj S., Kar S. Can extra dimensional effects replace dark matter? *Phys. Lett. B.* 2005. **609**(3–4): 194.
15. Viznyuk A., Shtanov Yu. Spherically symmetric problem on the brane and galactic rotation curves. *Phys. Rev. D.* 2007. **76**(6): 064009.
16. Krasnov K., Shtanov Yu. Halos of modified gravity. *Int. J. Mod. Phys. D.* 2009. **17**(13–14): 2555.
17. Novosyadlyj B., Pelykh V., Shtanov Yu., Zhuk A. *Dark Energy and Dark Matter in the Universe*. Vol. 1. Dark Energy: Observational Evidence and Theoretical Models. (Kyiv: Akadempriodyka, 2013).
18. Shulga V.M., Zhdanov V.I., Alexandrov A.N., Berczik P.P., Pavlenko E.P., Pavlenko Ya.V., Pilyugin L.S., Tsvetkova V.S. *Dark Energy and Dark Matter in the Universe*. Vol. 2. Dark Matter: Astrophysical Aspects of the Problem. (Kyiv: Akadempriodyka, 2014).
19. Vavilova I.B., Bolotin Yu.L., Boyarsky A.M., Danevich F.A., Kobychychev V.V., Tretyak V.I., Babyk Iu.V., Iakubovskiy D.A., Hnatyk B.I., Sergeev S.G. *Dark Energy and Dark Matter in the Universe*. Vol. 3. Dark Matter: Observational Manifestation and Experimental Searches. (Kyiv: Akadempriodyka, 2015).

Ю.В. Штанов

Институт теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова НАН Украины (Киев)

ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ ВО ВСЕЛЕННОЙ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ

По материалам научного доклада на заседании Президиума НАН Украины 23 сентября 2015 года

Совокупность данных астрофизических наблюдений указывает на наличие во Вселенной особой субстанции, проявляющей себя только своей гравитацией. Эта невидимая и прозрачная субстанция получила название темной материи. Современная теория эволюции Вселенной согласуется с данными наблюдений только при условии, что темная материя состоит из частиц доселе неизвестной природы. Исследование свойств и выяснение природы темной материи является одной из самых актуальных задач фундаментальной физики, астрофизики и космологии. В этом докладе мы расскажем, как ученые, в том числе и в Украине, исследуют свойства темной материи, которые могли бы пролить свет на природу этого явления.

Ключевые слова: темная материя, темная энергия, астрофизика, космология, физика элементарных частиц, теория гравитации.

Yu. V. Shtanov

Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv)

DARK MATTER IN THE UNIVERSE: CURRENT STATUS AND PROBLEMS

According to the materials of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine September 23, 2015

The totality of the data of astrophysical observations indicate the presence of a peculiar substance in the universe that manifests itself only by its gravity. This invisible and transparent substance is called dark matter. The modern theory of evolution of the universe is consistent with the observational data only provided the dark matter consists of particles of hitherto unknown nature. Study of the properties and elucidation of the nature of dark matter is one of the most important problems of fundamental physics, astrophysics and cosmology. In this report, we describe how scientists, including those in Ukraine, explore the properties of dark matter that might shed light on the nature of this phenomenon.

Keywords: dark matter, dark energy, astrophysics, cosmology, particle physics, theory of gravity.