

Темна енергія – загадка століття¹

*Б.Новосядлий,
д.ф.-м.н., директор Астрономічної обсерваторії
Львівського національного університету імені Івана Франка*

Кінець ХХ століття ознаменований відкриттям нової фізичної сутності – темної енергії, яка “розпирає” простір між галактиками і приводить до прискореного розширення Всесвіту. Її природа – невідома. Над її розгадкою працюють колективи вчених різних країн світу, формуються програми досліджень, будуються нові телескопи...

Відкриття

Те, що галактики віддаляються одна від одної зі швидкістю пропорційною відстані – відомо давно. Вперше це явище було виявлене американським астрофізиком Едвіном Габблом ще у 1929 році. За допомогою найбільшого у той час телескопа з діаметром дзеркала ~2.5 м (обсерваторія Маунт-Вільсон в Каліфорнії, США) він визначив відстані до найближчих галактик за допомогою знайдених у них змінних зір класу цефеїд, які є своєрідними маяками, що дозволяють визначати відстані. Зіставивши отримані відстані із їх швидкостями віддалення, визначеними В.М. Слайфером за зміщенням ліній у спектрах цих галактик, Габбл встановив, що швидкість віддалення окремої галактики тим більша, чим більша відстань до неї. Згодом, після підтвердження цього явища іншими астрофізиками, цю закономірність назвали законом Габбла.

Слід сказати, що це відкриття не було цілковитою несподіванкою – за сім років до цього його передбачив російський математик Олександр Фрідман, застосувавши рівняння загальної теорії відносності Айнштейна для опису еволюції однорідного ізотропного Всесвіту. Із розв'язків, отриманих ним, випливало, що такий всесвіт може розширюватися або стискатися. Що робиться із нашим Всесвітом – можна встановити тільки за даними астрофізичних спостережень. Із теоретичних робіт Фрідмана та експериментальних Габбла випливало, що спостережуване розбігання галактик є наслідком Великого вибуху, який за сьогоднішніми розрахунками стався 14 мільярдів років тому. У цьому контексті не можна не згадати і вклад Георгія Гамова, виходця з України, який у 1948 році висунув ідею гарячого раннього Всесвіту, наслідком якого є всюдисуще реліктове мікрохвильове випромінювання. Експериментально воно було виявлене тільки у 1965 році американцями Арно Пензіасом і Робертом Вільсоном, за що вони були удостоєні Нобелівської премії у 1978 році. Роботи Фрідмана, Габбла і Гамова стали основою цілого напрямку сучасної астрофізики – фізичної космології. Але оскільки для звичайної речовини діє закон всесвітнього тяжіння, чи інакше гравітація, то таке розширення повинно відбуватися із сповільненням: кінетична енергія розлітання галактик витрачається на “переборювання” сил гравітації (аналогічно до каменя, підкинутого вертикально вгору). Спроби визначити це сповільнення впродовж багатьох років були невдалими. Його значення дало б змогу встановити середню густину матерії, яка заповнює Всесвіт. Проблема полягала головню в тому, що для цього необхідно спостерігати дуже далекі галактики, блиск яких надто малий, тож виділити в них окремі джерела випромінювання – зорі, їх скупчення, газові туманності тощо – неможливо навіть за допомогою найпотужніших наземних телескопів. Крім того, світло від них рухається до нас кілька мільярдів років, через що ми бачимо їх значно молодшими за нашу та сусідні галактики, а отже джерела випромінювання в них відрізняються за своєю випромінювальною здатністю. Тобто, до них не можна застосувати методи визначення відстані, які застосовують астрофізики до близьких галактик.

¹ Відомий індійський фізик Т. Падманабхан свою статтю, присвячену цій проблемі, назвав «Темна енергія – загадка тисячоліття».

Ситуація змінилася із виведенням на навколораземну орбіту Космічного телескопа імені Габбла з діаметром головного дзеркала ~ 2.4 м. Одна із головних задач, для якої створювався цей найдорожчий у світі телескоп – дослідження далеких галактик з метою уточнення закону Габбла та визначення прискорення розширення Всесвіту. Результати досліджень, які проводили дві наукові групи – Співпраця по далеких наднових і Космологічний проект по наднових – майже десять років, були опубліковані практично одночасно у 1998 році. Уже із назв наукових груп видно, що об'єктами досліджень були наднові зорі у далеких галактиках. Надновими називають зорі, які зненацька спалахують і сяють як цілі галактики із сотнею мільярдів зір. Таке трапляється із деякими зорями на кінцевій стадії їх еволюції. Частота спалахів невелика – в одній галактиці наднова з'являється в середньому раз у тридцять років. Спалах триває всього кілька днів, стадія згасання – кілька місяців. Це означає, що їх виявлення є непростою задачею, і кожна наднова – велика подія для астрономів. Серед них є особливий тип наднових – коли вибухає карликова зоря на стадії горіння в її ядрі атомів вуглецю і кисню (тип Ia). Виявляється, спалахи таких зір відбуваються наче під кальку – хід зміни блиску з часом та поява характерних ліній свічення окремих хімічних елементів строго пов'язані і однакові у всіх наднових цього типу. Тобто, за спектром наднової Ia можна встановити її світність (випромінювальну здатність) незалежно від того, в якій галактиці вона знаходиться. Такі об'єкти в астрофізиці називають "стандартними свічками" (джерела світлової енергії з відомим значенням світності). Для близьких галактик такими є уже згадані цефеїди, зорі-гіганти найвищого класу світимості, яскраві газові туманності та інші. Але всі вони надто слабкі для реєстрації їх блиску у далеких галактиках. Наднові зорі завдяки їх величезній яскравості в момент спалаху можна спостерігати і в найвіддаленіших галактиках. З допомогою Космічного телескопа імені Габбла, а також найпотужніших наземних телескопів до сьогоднішнього дня у далеких галактиках виявили і детально дослідили трохи більше як півтора сотні наднових цього типу. Така властивість світних об'єктів є надзвичайно цінною для астрономії – вона дає можливість встановити абсолютну світність наднової, а за виміряним потоком енергії на Землі – визначити відстань до неї, а отже й до галактики, в якій вона знаходиться. За спектрами галактик можна визначити червоне зміщення ліній, а на основі відомого співвідношення видима зоряна величина – червоне зміщення знайти прискорення, з яким розбігаються галактики. Результати виявились вражаючими: замість очікуваного сповільнення взаємним гравітаційним притяганням вони розбігаються із прискоренням – швидкість віддалення галактик із часом зростає! Якщо повернутись до аналогії з каменем, підкинутим угору, то виглядає так: замість того, щоб сповільнюватись, рухаючись вгору, він прискорюється. За нашим земним досвідом – це неймовірно, за космічним – вимагає пояснення в рамках фізичних законів. Надійність спостережуваних даних і їх інтерпретації така висока, що найбільші скептики задумались.

Підтвердження

Отже, експериментальне виявлення явища прискореного розширення нашого Всесвіту по наднових типу Ia – надзвичайно складна і "багатоповерхова" задача. В дискусіях науковців довкола цього питання природньо виникають сумніви: чи справді наднові типу Ia є такими надійними стандартними джерелами свічення? чи не має пилу у міжгалактичному середовищі, який міг би послаблювати блиск наднових так, як це має місце в моделях Всесвіту з прискореним розширенням? чи не "маскуються" невраховані еволюційні ефекти під прискорене розширення Всесвіту? Розв'язати ці сумніви могли б тільки експерименти, базовані на інших фізичних принципах. Скажімо, визначити відстані до далеких галактик не за "стандартною свічкою", а за "стандартним метром", тобто об'єктом відомих розмірів. Звичайно, через величезні відстані астрономи користуються іншими одиницями довжини – світловими роками, парсеками, кілопарсеками, мегапарсеками, гігапарсеками. Нагадаю, що один парсек (назва походить від двох слів – паралакс і секунда) містить 31 трильйон кілометрів, або 3.26 світлових років. Наша зоряна система – галактика Молочний (або Чумацький) шлях – у поперечнику має близько 30 кілопарсек, скупчення галактик – кілька

мегапарсек. Але проблема у тому, що ні галактики, ні скупчення галактик не мають чітких границь – яскравість поступово спадає від центра до краю і кутові розміри змінюються з відстанню не тільки через геометричний ефект, але й фотометричний, а отже не можуть слугувати "стандартним метром". Розв'язок проблеми все ж було знайдено...

Реліктове випромінювання, про яке вже згадувалось, приходить на Землю зі всіх напрямків з однаковою інтенсивністю і розподілом квантів за енергією. Згенероване у Великому вибусі воно несе інформацію про молодий Всесвіт – ранню гарячу епоху, коли масштаби були у 1000 разів менші сьгоднішніх. Ні зір, ні галактик тоді ще не було, Всесвіт був однорідно заповнений електронами, протонами і великим числом квантів теплового електромагнітного випромінювання, енергії яких вистачало, щоб утримувати атоми водню і гелію (важчих елементів ще не було) в повністю іонізованому стані. Таке середовище непрозоре для випромінювання через розсіювання квантів світла на вільних електронах (грубою аналогією може бути туман, в якому випромінювання розсіюється на дрібних крапельках води). Внаслідок розширення Всесвіту енергія квантів падала і коли температура знизилась до 3000 градусів Кельвіна вони вже не могли відривати електрони від протонів – утворились нейтральні атоми водню (з гелієм це відбулося дещо швидше). Середовище стало прозорим для теплового випромінювання і воно почало вільно поширюватись. Всесвіту було тоді вього 370 000 років! Через скінчену швидкість поширення світла у будь-яку точку простору приходить випромінювання зі сфери довкола неї, де воно розсіялось востаннє. З часом її радіус збільшується і сьогодні становить майже 14 мільярдів світлових років! Ця сфера окреслює доступну для спостережень астрономічними методами область Всесвіту. Її називають сферою останнього розсіювання реліктового випромінювання. Всі об'єкти астрономічних досліджень знаходяться на ближчих відстанях, тобто реліктове випромінювання є заднім фоном. В англійській літературі його здебільшого так і називають – космічне мікрохвильове випромінювання заднього фону (cosmic microwave background radiation). Воно містить інформацію про ранній Всесвіт та фізичні процеси у ньому. Саме тому у вивчення реліктового випромінювання сьогодні вкладаються величезні фінансові і інтелектуальні ресурси людства. Нобелівська премія з фізики за 2006 рік була присуджена Джону Мазеру і Джорджу Смуту за всестороннє експериментальне вивчення властивостей реліктового випромінювання за допомогою космічного телескопа COBE (COsmic Background Explorer). Перший з них довів, що його енергетичний розподіл і справді є тепловим у всьому доступному для вимірів діапазоні довжин хвиль і температура його сьогодні становить 2.725 ± 0.001 градусів Кельвіна. Другий – виявив невеликі відхилення від його повної ізотропії (одинаковість властивостей у всіх напрямках) на рівні однієї тисячної відсотка (!), тобто невеликі за амплітудою флюктуації температури в різних напрямках на небі. Ці флюктуації зумовлені зародками елементів майбутньої структури Всесвіту – галактик, скупчень галактик, надскупчень. Їх шукали понад 20 років, але безуспішно. І тільки у 1992 році науковій команді COBE вдалося їх надійно зареєструвати. Кутова роздільна здатність цього телескопа була невелика – всього 10 градусів. В наступних експериментах вона була доведена до 0.3 градуса і саме це дозволило встановити "стандартний метр", важливий для визначення космологічних параметрів нашого Всесвіту. Ним є характерний масштаб гарячих та холодних плям на температурній карті неба, отриманій в радіодіапазоні довжин хвиль реліктового випромінювання. Такий масштаб визначається шляхом, який подолала звукова хвиля у баріонно-фотонній плазмі до моменту часу, коли середовище стало прозорим для теплового випромінювання. Якщо вміст усіх типів речовини та енергії, що заповнюють Всесвіт, відомий, то цей масштаб можна розрахувати: він становить 150 мегапарсек, або 490 мільйонів світлових років («стандартний метр»!). Співвідношення між лінійним та кутовим масштабом на сфері останнього розсіювання залежить від параметрів космологічної моделі: середньої густини матерії та темної енергії.

Перші результати визначення характерних кутових розмірів таких плям були отримані у 2000-му році в стратосферних експериментах BOOMERanG і MAXIMA. Вже вони показали, що характерні кутові розміри плям узгоджуються з моделями, в яких переважає за густиною темна енергія, яка зумовлює прискорене розширення Всесвіту у

сучасну епоху. Остаточо це підтвердив космічний експеримент WMAP, в якому отримано карту всього неба в різних довжинах хвиль реліктового випромінювання (від 3 до 13 мм). Результати одного року спостережень, проведених в рамках цього експерименту, були опубліковані у 2003 році, а трьох років спостережень – у 2007-му. Характерні кутові розміри плям, отримані в цьому експерименті, становлять 0.6 градуса. Лінійні і кутові розміри узгоджуються між собою у моделях, в яких частка темної енергії складає не менше 70%! Таким чином було отримано незалежене підтвердження існування темної енергії, причому отримані оцінки її густини в обох тестах добре узгоджуються між собою.

Є й інші непрямі свідчення на її користь. Американські астрофізики Нета Бакал і Хяогу Фан виявили кілька дуже масивних скупчень галактик на відстані майже десяти мільярдів світлових років. Тобто, вік Всесвіту в момент, коли спостережуване тепер світло покинуло ці об'єкти, становив третину сучасного віку Всесвіту. Аналізуючи можливості їх утворення в таку ранню епоху еволюції Всесвіту, вони прийшли до висновку, що це можливо тільки в моделях з темною енергією. Галактики та скупчення галактик розкидані у Всесвіті не однорідно, а утворюють згущення і розрідження різних масштабів. Аналізуючи такі неоднорідності та відхилення швидкостей галактик під їх впливом від закону Габбла, учені прийшли до висновку, що густина матерії, яка самогравітує, складає не більше третини повної густини енергії Всесвіту.

Якщо скласти всі ці дані як частинки мозаїки в одне ціле, то вимальовується такий склад нашого Всесвіту: темна енергія – 73%, темна матерія – 22%, баріонна речовина – 5%. Баріонна речовина – це всі хімічні елементи, які входять до складу зір, планет, галактик та розсіяні у міжзоряному та міжгалактичному просторі. Одна із її важливих властивостей – участь у електромагнітній взаємодії: вона поглинає, випромінює та розсіює електромагнітне випромінювання. Завдяки саме цій властивості наш світ такий багатий різноманітним проявам живої та неживої природи.

Темна матерія приймає участь тільки у гравітаційній взаємодії та, можливо, слабкій. Вона не випромінює, не поглинає і не розсіює електромагнітного випромінювання, тому й названа темною. Її виявили і вивчають за гравітаційним впливом на світлу речовину – газ, зорі, галактики. Неоднорідності темної матерії своїм гравітаційним полем стягували до себе баріонну речовину, в згустках якої сформувались зорі, галактики, скупчення галактик. Які частинки є носіями темної матерії поки-що невідомо. Теорія елементарних частинок пропонує цілий “зоопарк” гіпотетичних частинок кандидатів в темну матерію. Необхідні ключові експерименти та астрофізичні тести для їх відбору.

Із темною енергією, яка домінує за густиною, ситуація ще складніша. Вона проявляє себе тільки на космологічних відстанях протилежним знаком гравітаційної дії. Це справді нова сутність, не подібна до всього того, з чим мали справу до цього часу фізики у своїх лабораторіях і астрономи в царині зір і галактик. Чи було її відкриття повною несподіванкою для теоретиків?

Гіпотези

Слід визнати, що ні. Ще у 1917 році Альберт Айнштайн доповнив рівняння загальної теорії відносності, які він отримав у 1916-му, сталим доданком, який урівноважував гравітаційне притягання звичайної матерії. Вона працювала як сила розштовхування пропорційна відстані і проявляла себе тільки на космологічних масштабах. Її назвали космологічною сталою. Введенням цього доданку Айнштайн прагнув отримати стаціонарну модель однорідного ізотропного Всесвіту, яким він тоді собі його уявляв. Властивості світу із космологічною сталою але без матерії детально проаналізував де Сіттер у тому ж 1917 році (модель світу де Сіттера). Олександр Фрідман у 1922 році довів, однак, що навіть із космологічною сталою загальний розв'язок рівнянь Айнштайна нестаціонарний. Айнштайн погодився з аргументами Фрідмана і згодом відмовився від космологічної сталої, сказавши, що її введення було найбільшим промахом у його житті. Про це згадує Георгій Гамов у книзі «Моя світова лінія». Проте космологічна стала продовжувала «жити» і астрофізики не раз зверталися до неї, щоб розв'язати проблеми, які виникали при інтерпретації даних

спостережувальної космології, і відкидали, коли знаходили прийнятніші пояснення. На початку 80-х модель де Сіттера дозволила розв'язати клубок проблем, який виник при розбудові теорії раннього Всесвіту в рамках моделей Фрідмана: проблема початкового надшільного стану (проблема сингулярності), проблема однаковості властивостей реліктового випромінювання у всіх напрямках – на момент його відриву від речовини точки віддалені більше як на 2 градуси були поза межами досяжності будь-яких фізичних взаємодій (проблема горизонту), проблема евклідовості простору у всій доступній для спостережень області (проблема плоскості), відсутність магнітних монополів, які передбачаються теоріями Великого об'єднання, та інших. Синтез властивостей світу де Сіттера і квантової теорії поля породив квантову космологію та інфляційну модель раннього Всесвіту – короточасну стадію швидкого прискореного розширення, яка елегантно розв'язала усі ці проблеми. (Значним вкладом у становлення квантової космології є роботи середини 70-х років відомого українського вченого П.І. Фоміна). І, зрештою, космологічна стала цілком задовільно пояснює прискорене розширення Всесвіту, яке виявили за тестом видима зоряна величина – червоне зміщення, характерні кутові розміри плям на картах неба реліктового випромінювання (експерименти BOOMERanG, MAXIMA, WMAP), існування масивних скупчень галактик на високих червоних зміщеннях ~ 1 і інші дані спостережувальної космології. Скидається на те, що «промах» Айнштейна є насправді геніальною здогадкою, яка знайшла експериментальне підтвердження через 81 рік! Але намагання збагнути фізичну суть космологічної сталої породили низку запитань, відповіді на які можуть бути тим Розетським каменем, який приведе до побудови теорії єдиних взаємодій та походження Всесвіту. Саме тому цей напрям досліджень є одним із найпріоритетніших у фізиці та астрофізиці, до нього залучаються найпотужніші наукові колективи, в тому числі і українські.

Що ж це за запитання? Космологічна стала незмінна з часом – її значення сьогодні таке ж як і в момент Великого вибуху. Але якщо сьогодні густина темної енергії приблизно в 3 рази більша за густину матерії (баріони + темна матерія), то на початку Великого вибуху вона була на 120 порядків (!) менша. Тобто, у ранню епоху еволюції Всесвіту, коли формувались фізичні взаємодії її густина енергії становила $0.000\dots\dots 1$ (120 нулів перед одиницею) від густини енергії інших фізичних полів. Це дуже мала величина, практично нуль. Однак, якщо б перед одиницею було 115 чи 100 нулів, то це привело б до фатальних наслідків – Всесвіт почав би прискорено розширюватись ще до того, як утворились галактики, зорі, планети і життя на них. Зростаючий темп розлітання не дав би їм сформуватися. У такому всесвіті нічого б не було, і нас з вами, дорогий читачу. Тому виникає проблема пояснення такого точного налаштування значення космологічної сталої в ранньому Всесвіті. Спонтанно чи випадково таке налаштування не могло відбутися, принаймні задовільного пояснення цього явища фізики поки-що не мають. З іншої сторони, якщо інтерпретувати космологічну сталу як властивості вакууму (енергія його основного стану), то з'являються розбіжності із квантовою електродинамікою, яка сьогодні є чи не найточніше експериментально перевіреним розділом фізики. Все це спонукає фізиків і астрофізиків шукати альтернативу космологічній сталій.

Такою альтернативою є темна енергія – сутність Всесвіту, яка подібно до космологічної сталої зумовлює його прискорене розширення. Нею є новий тип фізичного поля (інколи називають п'ята сутність – квінтесенція), яке однорідно заповнює наш Всесвіт і розпирає простір. Сьогодні його густина енергії переважає середню густину енергії всіх інших полів і частинок, що зумовлює спостережуване прискорене розширення Всесвіту на космологічних масштабах. Але у минулому вона могла бути близькою до густини інших фізичних полів, або щезати цілком, в залежності від моделі такого поля. Аналізуються найпростіші з них – скалярні поля. В арсеналі теоретиків варіантів таких полів багато. В залежності від фізичних властивостей, впливу на звичайну та темну матерію, поведінки у минулому та майбутньому вони діляться на кілька класів (класичне скалярне поле -- квінтесенція, тахіонне поле, фантомне поле, k-есенція, газ Чаплигіна тощо). Проте жоден з них ще не має вирішальних переваг ні теоретичного характеру, ні підтверджень чи суперечностей із спостереженнями. Невідомо також, яким чином темна енергія пов'язана із

первісним скалярним полем, яке зумовило інфляційну стадію у ранньому Всесвіті. Для встановлення природи темної енергії необхідно детально вивчити її вплив на динаміку розширення Всесвіту в різні епохи його еволюції, формування структури та анізотропії реліктового випромінювання з тим, щоб знайти ключові тести для кожного класу.

Інша альтернатива – узагальнення теорії гравітації Айнштейна на більше число просторово-часових вимірів. Наш 3+1 вимірний світ в такій моделі є наче тонка плівка у просторі-часі більшої розмірності, на якій «зайві виміри» компактифіковані. Всі матеріальні поля і взаємодії зосереджені в цій плівці, а гравітація є проявом дії багатовимірного простору. Багато властивостей спостережуваного Всесвіту у цій моделі з'являються досить природньо, в тому числі і прискорене розширення. Цей напрямок, який започаткований ще у 20-х роках минулого століття німецькими математиками Калуцою і Кляйном, в наш час бурхливо розвивається і обіцяє відкрити нам незвичні властивості світу в інших вимірах.

І, зрештою, найрадикальніша альтернатива – це модифікація теорії гравітаційної взаємодії. Загальна теорія відносності перевірена прямими експериментами тільки в межах Сонячної системи. Астрономічні спостереження об'єктів з поза її меж вимагає введення поняття темної матерії та темної енергії чи космологічної сталої. Робляться спроби модифікувати закон всесвітнього тяжіння і закони Ньютона таким чином, щоб пояснити всі спостережувані дані без залучення неспостережуваних в лабораторіях полів і частинок. Поки-що роботи у цьому напрямку тривають... Дослідників надихає поведінка космічних апаратів Піонер-10 і Піонер-11, які досягли меж Сонячної системи, – в їх русі начебто виявлено відхилення, які не пояснюються законом всесвітнього тяжіння та загальною теорією відносності. Але навіть у разі прориву в цьому напрямку проблема темної матерії та темної енергії не зникає, бо існуючі сьогодні варіанти теорії Великого об'єднання передбачають як існування частинок із властивостями темної матерії, так і скалярних полів із властивостями темної енергії.

Усі ці напрямки вимагають вдосконалення математичного апарату загальної теорії відносності та його застосувань до інтерпретації даних астрономічних спостережень. Дослідження властивостей чорних дір, передбачених загальною теорією відносності, та поведінки речовини в їх околицях є надзвичайно важливою задачею релятивістської астрофізики. Потужним інструментом у дослідженнях просторового розподілу темної матерії і властивостей темної енергії стає новий напрям досліджень – гравітаційне лінзування об'єктів заднього фону об'єктами переднього, який дуже активно розвивається у світі. Гравітаційні хвилі є поки-що єдиним не зареєстрованим у прямому експерименті передбаченням загальної теорії відносності. Ці та інші задачі, пов'язані із розвитком теоретичних та експериментальних аспектів загальної теорії відносності, є сьогодні на передньому краю фізики та астрофізики.

Перспективи

Дослідження природи темної енергії у наш час розвиваються надзвичайно бурхливо. Наукові фонди Європи, Америки та Росії фінансують ці дослідження як найбільш пріоритетні, оскільки їх результати важливі як для теорії еволюції зір, галактик і Всесвіту як цілого, так і для теорії елементарних частинок та фундаментальних взаємодій. Впродовж наступних десяти років планується ввести в дію кілька телескопів нового покоління, з допомогою яких точність визначення рівняння стану темної матерії буде доведена до 1% (сьогодні вона становить близько 20%). В Україні такі дослідження проводяться невеликими науковими групами в кількох національних класичних університетах Міністерства освіти і науки (Одеському, Львівському, Харківському, Дніпропетровському), Київському національному університеті імені Т. Шевченка, Національному університеті «Києво-Могилянська Академія» та наукових установах Національної академії наук (Головна астрономічна обсерваторія, Інститут теоретичної фізики, Інститут ядерних досліджень, Радіоастрономічний інститут, Інститут прикладних проблем механіки і математики). Для об'єднання їх зусиль та координації досліджень у 2005 році запроваджено «Міжгалузевий координаційний план досліджень в галузі гравітації, релятивістської астрофізики та

космології – космомікрофізика» (голова Наукової ради академік А.Г. Загородній). Ініціаторами такої координації досліджень виступили директор Астрономічної обсерваторії КНУ ім. Т. Шевченка д.ф.-м.н. Б.І. Гнатик (м. Київ) та заступник директора з наукової роботи ІППММ НАНУ д.ф.-м.н. В.О. Пелих (м. Львів). У січні 2007 року на спільному засіданні Президії Національної академії наук України та Колегії Національного космічного агенства України за представленням академіка Я.С. Яцківа прийнята цільова програма наукових досліджень НАНУ «Дослідження структури та складу Всесвіту, прихованої маси і темної енергії», виділено кошти на її реалізацію. Керівник цієї програми – академік В.М. Шульга. Крім виконання великого кола досліджень уже існуючими групами, програма передбачає підготовку і залучення молодих вчених до її виконання, видання наукової, навчальної та науково-популярної літератури. Таким чином, є підстави сподіватись, що здобутки українських вчених в цій галузі будуть цитуватися не тільки в ретроспективних оглядах розвитку проблеми, а перебуватимуть на передньому краї науки, примножуючи наші знання про найфундаментальніші властивості світу, в якому ми живемо.

Список рекомендованої літератури:

1. «Величний космос». Спеціальний випуск журналу «Світ науки» 2001, №2 (8).
2. М. Сажин, О. Сажин. Прискорене розширення і «темна енергія» Всесвіту. Журнал «Світогляд», 2007, №3 (5), с. 40-49.
3. О. Біланюк. Вогонь чи лід: Яким буде кінець світу?. Журнал «Світ фізики», 2000, №4, с.3-7.
4. К. Конселіс. Невидимая рука Вселенной. Журнал «В мире науки», 2007, №6.
5. Б. Новосядлий. Основи і становлення сучасної космології. Журнал «Педагогічна думка», 2004, №2, с. 3-12.