

ПРАКТИЧНА РОБОТА З АСТРОНОМІЇ НА ТЕМУ: «ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМНОЇ ЕНЕРГІЇ ЧЕРЕЗ МЕРЕЖУ ІНТЕРНЕТ»

*Юрій Борисович Мирошніченко,
кандидат педагогічних наук, учитель фізики та
астрономії Центральненської ЗОШ І-ІІІ ступенів,
методист відділу освіти
Миронівської райдержадміністрації*

Мета дослідження: полягає у теоретичному дослідженні через мережу Інтернет результатів сучасних наукових даних з космічних лабораторій, провідних науковців та астрономічних інститутів, дізнатися більше про темну енергію та закони гравітації присущої космічним об'єктам з величезними масами.

Теоретичні відомості.

Кінець 20 століття ознаменований відкриттям нової фізичної субстанції - темної енергії, яка “розпирає” простір між галактиками і призводить до прискореного розширення Всесвіту.

Вона домінує за середньою густиною, впливає на темп утворення галактик та їх скупчень, проте, залишається невловимою у лабораторіях фізиків. Її природа невідома. Над її розгадкою працюють колективи вчених з різних країн світу, формуються програми з дослідження, будуються нові телескопи...

Поки одні теоретики пропонують все нові і нові моделі темної енергії, інші задаються питанням: а чи існує вона взагалі? Можливо закони гравітації на космологічних масштабах відрізняються від тих, що перевірені експериментами в межах Сонячної системи і спостереженнями в масштабах галактик? І розвивають нові, або узагальнюють “теорію в законі” на інші виміри, які б пояснили спостережуване прискорене розширення нашого Всесвіту, чи показали, що в рамках нових теорій його не має.

Наскільки важлива відповідь на ці запитання можна переконатись набравши в **Google** ключове слово dark energy. Ця тема не сходить зі сторінок наукових журналів з високим імпакт-фактором в області фізики і астрофізики, так само, як і науково-популярних світових видань.

Що таке “темна енергія”? Пояснимо для початку сам термін, оскільки вже в ньому є певне протиріччя: якщо існує енергія, то хіба вона може бути абсолютно темною? Темрявою ми називаємо відсутність світла, а світло, як відомо, це електромагнітне випромінювання з довжинами хвиль від 400 до 760 нанометрів (мільярдна частка метра), яке сприймається нашим оком і називається видимим чи оптичним діапазоном електромагнітного спектра. Ми добре знаємо також, що за межами цього є електромагнітні хвилі, що відносяться до радіо-, інфрачервоного, рентгенівського та гамма-діапазонів. Потрібен лише прилад, який вловлює це випромінювання і перетворює його в інший сигнал, доступний для реєстрації нашими органами чуття. Більше того, ми знаємо, що будь-яке тіло, температура якого вища за абсолютний нуль температури ($-273,15^{\circ}\text{C}$) випромінює. Оскільки, ні в оточуючому нас світі, ні в близькому і далекому

космосі не існує речовин з такою температурою, то і немає абсолютно темної речовини. Та навіть, якщо уявити собі, що десь така речовина існує, то її можна було б знайти за поглинанням, або розсіюванням електромагнітного випромінювання, яке проходить через нього (в якості ілюстрації сказаного, наведено фото туманності Кінська голова) [3].



Рис.1. Темна пилова туманність "Кінська голова" в сузір'ї Оріона, яку видно за поглинанням нею світла газової емісійної туманності Оріона.

А все, що можна зареєструвати в будь-якому діапазоні електромагнітного випромінювання, вже не є невидимим чи темним. Так вважають астрономи, які освоїли весь діапазон електромагнітного випромінювання. Вони навчилися "бачити" речовину, яка складається із атомів, молекул, пилинок чи іонів і т.д незалежно від діапазону, в якому вони випромінюють чи поглинають. Річ у тім, що атоми складаються з елементарних частинок — електронів, протонів й нейтронів, які приймають участь у електромагнітній взаємодії. І лише фундаментальні частинки, які не приймають в ній участі можна назвати темною матерією. Вони не випромінюють і не поглинають.

Сьогодні є всі підстави припускати, що в нашому Всесвіті такої темної матерії приблизно в п'ять разів більше, ніж звичайної речовини, здатної випромінювати, розсіювати чи поглинати електромагнітне випромінювання.

Природа цієї складової нашого Всесвіту досі невідома, але фізики та астрономи докладають величезних зусиль для її встановлення. Можливо уже найближчими роками ми станемо свідками реєстрації їх слідів в експериментах на Великому адронному колайдері чи в детекторах космічних променів. Це надзвичайно актуальна і цікава проблема сучасної фізики та астрофізики, але тут мова піде про ще більш дивну приховану складову - темну енергію, яка подібно до невидимого ефіру рівномірно заповнює наш Всесвіт і заставляє його прискорено розширюватися, чим радикально відрізняється від темної матерії. Як і темна матерія, темна енергія не приймає участі в електромагнітній взаємодії, а проявляється за гравітаційною дією на звичайну речовину, завдяки якій і була відкрита [4].

Відкриття темної енергії. Те, що галактики віддаляються від нас із швидкістю, яка пропорційна відстані до них, стало відомо ще в 20-х роках минулого століття. Вперше це явище було відкрито американським астрофізиком Едвіном Габблом у 1929 році. За допомогою найбільшого в той час телескопа з діаметром дзеркала ~2.5 м (обсерваторія Маунт-Вільсон в

Каліфорнії, США) він визначав відстань до найближчих галактик за знайденими в них пульсуючих яскравих зір - цефеїд, які є своєрідними маяками нашої і сусідніх галактик. Співставивши їх зі швидкостями, виміряними Весто. Слайфером за червоними зміщеннями ліній в спектрах цих галактик, Е. Габбл встановив, що швидкість віддалення галактик тим більша, чим більша відстань до них. Згодом після підтвердження цього явища іншими астрофізиками, цю закономірність назвали законом Габбла [3].

Варто зауважити, що експериментальне відкриття розширення Всесвіту не були цілковитою несподіванкою для теоретиків - за сім років до цього таку властивість однорідного ізотропного Всесвіту передбачив Олександр Фрідман, використавши для його опису рівняння Айнштейна загальної теорії відносності. Із отриманих ним розв'язків випливало, що однорідний ізотропний світ може або розширюватись або стискатись. Що відбувається з нашим Всесвітом — можна встановити лише на основі спостережень. Габбл довів, що він розширюється. Теорія Фрідмана і емпіричний закон Габбла однозначно вказують на те, що таке розширення є подібним до вибуху - воно почалося в один і той самий момент часу для всіх галактик. Пізніше його так і назвали — Великий Вибух, який поклав початок існуванню того Всесвіту, в якому ми зараз живемо. За сучасними оцінками він відбувся майже 14 мільярдів років тому. В такому світі немає виділеного центру розширення - із всіх галактик воно виглядає однаково.

Друга важлива властивість світу, заповненого звичайною речовиною — його розширення повинно відбуватися з уповільненням. Справді, самогравітація — взаємне притягання внаслідок дії закону всесвітнього тяжіння між частинками (галактиками) такого середовища - призводитиме до зменшення швидкості розлітання. В якості очевидної аналогії можна привести приклад з каменем, підкинутим вгору: незалежно від початкової швидкості він буде віддалятися від поверхні з уповільненням, його початкова кінетична енергія буде йти на подолання сили тяжіння Землі. Величина сповільнення визначається масою і радіусом Землі і на поверхні однакова для всіх тіл (9.8 м/с^2). Знаючи закон всесвітнього тяжіння і вимірявши це прискорення, можна легко визначити масу Землі або її середню густину за відомим (виміряним) середнім радіусом Землі. Подібна ситуація і в світі галактик: величина уповільнення розширення визначається середньою густиною речовини Всесвіту. Спроба виміряти таке уповільнення з метою визначити середню густину речовини у Всесвіті робилися неодноразово, але досягти необхідної точності не вдавалося. Надто слабе світло далеких галактик для визначення відстані до нас за блиском тих же цефеїд, котрі використовував Габбл в своїх вимірах. А виміряти таке уповільнення можна спостерігаючи тільки дуже далекі галактики. Крім того, світло від таких галактик досягає Землі за мільярди років, тобто, ми бачимо їх на стільки ж років більш “молодими”, ніж близькі галактики. Це означає, що джерела світла в них мають іншу невідому нам світність (кількість випромінюваної світлової енергії за одиницю часу) внаслідок еволюційних ефектів і для них не можна використовувати методи визначення відстані, які астрофізики використовують для близьких галактик [3].

Ситуація змінилась із виведенням на доколаземну орбіту Космічного телескопа імені Габбла з діаметром головного дзеркала 2.4 м. Однією з головних задач, для яких створювався цей найдорожчий телескоп світу — дослідження далеких галактик з метою уточнення закону Габбла і визначення уповільнення розширення Всесвіту.



Рис. 2. Багате скупчення галактик Ейбел 1263. Блакитною димкою показано розподіл темної матерії, встановлений на основі гравітаційного лінзування ним зображень галактик далекого фону. Темна енергія розподілена рівномірно (чорний колір)..

Результати дослідження, які проводили незалежно дві наукові групи майже десять років «Співпраця по далеких наднових» (науковий керівник Сол Перльмуттер) і «Космологічний проект по наднових» (науковий керівник Адам Ріс) - були опубліковані практично одночасно в 1998 році. Вже із наведених назв груп видно, що об'єктами їх дослідження були наднові зорі в далеких галактиках. Надновими називають зорі, які закінчують основний найтриваліший цикл свого життя як зорі вибухом і яскравим спалахом: їх світність в максимумі блиску в мільярди разів перевищує світність Сонця!

Певний час така наднова випромінює як ціла галактика із сотень мільярдів зір. Таке стається з деякими зорями на кінцевих стадіях їх еволюції. Частота появи таких зір невелика - в одній галактиці наднові спалахують приблизно один раз на тридцять років. Тривалість спалаху в максимумі блиску всього декілька днів, згасання, коли вона ще спостерігається — від декількох тижнів до двох місяців. Це означає, що їх виявлення в далеких слабких галактиках є складною задачею (потрібно регулярно проглядати зображення великої кількості галактик), і кожне таке виявлення є великою подією для астрономів [4].

Серед них є особливий тип наднових - коли спалахує карликова зоря на стадії горіння в її ядрі атомів вуглецю і кисню (тип Ia), яка знаходиться в тісній подвійній системі. Виявляється, що спалах таких зір однаковий — блиск в максимумі, його подальше зменшення, поява характерних ліній в спектрі строго корелюють. Таким чином, за кривою блиску і кольору можна встановити її істинну світність, незалежно від того, в якій галактиці вона перебуває. Маючи істинну світність (або абсолютну зоряну величину) і виміряний потік на Землі (або видиму зоряну величину) легко знайти відстань до неї, а значить і до галактики, в якій вона знаходиться. Об'єкти з відомими світностями в астрофізиці називають "стандартними свічками". Для

близьких галактик такими є вже згадані цефеїди, зорі-гіганти найвищого класу світимості, яскраві газові туманності та ін. Проте, всі вони мають надто малий блиск для їхньої реєстрації в далеких галактиках, до того ж еволюційні ефекти для них зовсім не вивчені. Наднові, навпаки, завдяки їхній величезній яскравості в моменти спалаху або недовго після нього можна спостерігати і вивчати (вимірювати блиск, колір, спектр) і в найбільш віддалених галактиках.

Відкриття прискореного розширення Всесвіту стало науковою сенсацією. У спробах його пояснення у словнику фізиків і космологів з'явилися такі терміни, як темна енергія, модифікована гравітація, антигравітація, космічне відштовхування та ін. Перш ніж перейти до обговорення варіантів фізичних причин цього прискорення, необхідно відзначити дві його важливі емпіричні властивості:

1) Воно проявляється тільки на космологічних відстанях, значно більших розмірів гравітаційно- зв'язаних структур Всесвіту — галактик, груп і скупчень галактик. Всередині і в найближчих околицях цих об'єктів панує звичайна відома нам гравітація і жодного прискореного розширення не відбувається.

2) Всі виявлені найновіші типу Ia знаходяться в галактиках з червоними зміщеннями від $z \approx 0.02$ до $z \approx 1.5$, що відповідає діапазону відстаней від 100 до 4300 Мпк. Наднові на максимальних відстанях спалахнули, коли вік Всесвіту дорівнював приблизно 4 млрд. років, а найближчі - коли він становив 13.4 млрд. років. Таким чином, спостерігаючи об'єкти на різних відстанях ми бачимо Всесвіт у минулому і можемо відновити динаміку його розширення від ранніх часів до сучасної епохи. Виявляється, що прискорено розширюватися Всесвіт почав, коли його вік був приблизно 6 млрд. років, тобто, вдвічі молодший [3].

Темна енергія або модифікована гравітація? Сьогодні активно розвиваються два підходи до пояснення виявленого прискореного розширення Всесвіту: а) введення нової фізичної субстанції, що отримала узагальнену назву «темна енергія», б) модифікація або узагальнення рівнянь гравітації. У кожному з них запропоновано безліч моделей, але далеко не всі, пояснюючи прискорене розширення Всесвіту, узгоджуються зі всією сукупністю даних про властивості нашого світу у всіх просторово-часових масштабах. Слід знову ж таки відзначити, що відкриття прискореного розширення Всесвіту не було повною несподіванкою для теоретиків, у них був досвід аналізу властивостей світу з космологічною постійною, а також успішний розвиток інфляційної космології - моделі раннього Всесвіту з короткочасною фазою експоненціального розширення, на якій розширення відбувається прискорено. Публікація перших повідомлень і подальші підтвердження відкриття прискореного розширення Всесвіту стимулювали роботи з його фізичної інтерпретації у вказаних напрямках. Приведемо основні, найбільш опрацьовані моделі [3].

Темна енергія. Для пояснення її фізичних властивостей доведеться все ж привести декілька формул з шкільного курсу фізики і їх простих узагальнень. З класичного (ньютонівського) закону всесвітнього тяжіння виходить, що будь-яка частинка незалежно від її маси в гравітаційному полі тіла з масою M на відстані r від його центру рухається з прискоренням $g = -GM/r^2$, де G —

гравітаційна постійна, одна з фундаментальних констант нашого світу.

Оскільки всі величини в правій частині завжди позитивні, то прискорення завжди негативне. І оскільки прискорення з негативним знаком називають уповільненням, то будь-яка частка в полі іншої частки завжди віддаляється з уповільненням. Уявимо тепер, що частка знаходиться в однорідній сферичній хмарі густиною ρ на відстані r від її центру. Піддією сили тяжіння речовини, що знаходиться усередині сфери радіуса r , її прискорення дорівнює $g = -4\pi G\rho r/3$, оскільки $M=4\pi\rho r^3/3$. І в цьому випадку прискорення теж буде завжди негативним (величини $\pi=3.14$, G , ρ , r в правій частині завжди позитивні), тобто, сповільнений рух частинки в хмарі, що розширюється. В однорідному ізотропному світі будь-яка частинка може бути вибрана за центр хмари, отже, будь-яка інша частинка віддалятиметься з уповільненням. Загальна теорія відносності дещо узагальнює приведий вираз для прискорення з врахуванням вкладу тиску середовища P в таке прискорення наступним чином: $g = -4\pi G(\rho+3P/c^2)r$, де $c=2.998\cdot 10^8$ м/с — швидкість світла, важлива фундаментальна константа нашого світу. Оскільки значення величини швидкості світла (а в знаменнику вона ще і в квадраті!) дуже велике, то для всіх відомих нам рівнянь стану речовини на Землі і в зорях значення $3P/c^2$ на багато порядків менше, ніж ρ , і ним можна знехтувати при додаванні величин в дужках. І лише при екстремально великих температурах досягаються умови коли $P\approx\rho c^2/3$, і вклад тиску на уповільнення порівнюється з впливом густини. Але зауважте, позитивний тиск уповільнює, а не прискорює розширення, як може здатися з огляду на те, що сила тиску, діючи назовні, «розпирає» газ, а гравітація навпаки, «тягне» усередину, намагається стиснути його. Це релятивістський ефект, в основі якого принцип еквівалентності маси і енергії $E=mc^2$. Всі речовини у всіх станах на Землі і в космосі мають позитивний тиск. У звичайній матерії і темній матерії він дуже малий, для випромінювання він такий ж як і для ультрарелятивістського середовища $P=\rho c^2/3$.



Рис. 3. Ілюстрація впливу тиску на гравітацію. Потенціальні ями відповідають за гравітаційне притягання, горби – за відштовхування. Чим більший додатний тиск, тим глибша яма, тим сильніше притягання (випромінювання). У випадку від'ємного тиску - чим він більший за абсолютною величиною, тим сильніше відштовхування (Рисунок взято з [1]).

Отже, ніщо з вже вивченого земною і космічною фізикою не в змозі пояснити прискорене розширення Всесвіту. Але оскільки, спостереження вказують на його позитивний знак, $g = -4\pi G(\rho + 3P/c^2)r/3 > 0$, то звідси випливає, що в нашому Всесвіті є ще одна субстанція, яка і забезпечує негативний знак суми в дужках: $(\rho + 3P/c^2) = (\rho_m + \rho_x + 3P_x/c^2) < 0$, де ρ_m — густина матерії (баріонна речовина, темна матерія), а ρ_x і P_x — густина і тиск нової невідомої субстанції. Причому її тиск — це її внутрішній тиск, на саму себе, а не на матерію. Більшого, він негативний: $P_x < -(\rho_m c^2 + \rho_x c^2)/3$ для позитивної густини ρ_m і ρ_x . Це незвичайно, виходить за межі нашого земного досвіду, але не заборонено законами фізики. Таким чином, із спостережуваного факту прискореного ($g > 0$) розширення Всесвіту виходить, що вона однорідно заповнена субстанцією з позитивною густиною ρ_x і негативним внутрішнім тиском $P_x < -(\rho_m c^2 + \rho_x c^2)/3$. На всі інші види матерії і енергії вона діє лише гравітаційно і не приймає участі в електромагнітних, слабких і сильних (ядерних) взаємодіях, нічого не випромінює і нічого не поглинає [3,4].

Вона дійсно темна, темніша за темну матерію, тому її назвали темною енергією. Таким загальним властивостям темної енергії — позитивна густина, негативний великий по абсолютній величині тиск, участь лише в гравітаційній взаємодії — можуть задовольняти, зокрема, скалярні поля або «рідини», яких в арсеналі теоретиків велика кількість. Як правило, всіх їх можна звести до представлення ідеальної рідини з рівнянням стану вигляду: $P_x = w\rho_x$, де $w < -1/3$ — параметр рівняння стану. Він може бути постійною величиною, більшою, або меншою, ніж -1 , або змінюватися з часом за якимось законом. Який він є насправді у нашому Всесвіті — має бути отримано із спостережень. Найбільш простий випадок постійного $w = -1$ відповідає космологічній сталій Айнштейна. Таке поле має малу постійну в часі густину ($\rho_x \approx 10^{-29} \text{ г/см}^3$) і є ідеально однорідним. У всіх системах відліку воно однакове як вакуум, тому його ще називають вакуумним. Але спроби узгодити низьку густину енергії цього поля з енергією нульових квантовомеханічних коливань вакууму наразі безуспішні. Ще одна гостра проблема, що не має задовільного пояснення, — так звана проблема тонкого налаштування. Її суть в наступному. Космологічна стала або густина енергії вакууму, яка їй відповідає, незмінні в часі — їх значення такі ж як і у момент Великого Вибуху. Але в ранню епоху, відразу після Великого Вибуху, коли формувалися фізичні взаємодії, вона була на 120 порядків нижче за щільність всіх інших фізичних полів (їх відношення $0.000 \dots 1$, де перед одиницею 120 нулів!). Це дуже маленька величина, практично нуль. Та якби перед одиницею було 115 або 125 нулів, то світ був би зовсім іншим, і нас у ньому, скоріш за все, не було б. Як відбулося таке точне налаштування світових констант?

Моделі, що розглядаються на сучасному етапі вивчення темної енергії можна розділити на декілька типів, що відрізняються характером зміни в часі її параметрів, здатності реагувати на неоднорідності розподілу матерії або генерувати свої, і, як наслідок, впливати на минулу і майбутнє Всесвіту. Основні з них, які найчастіше згадуються в науковій літературі, такі [3,4,5].

Квінтесенція (або п'ята сутність). Параметр рівняння стану w в даний часу має значення менше $-1/3$, але більше -1 . Густина енергії квінтесенції

повільніше за інші компоненти зменшується з часом і з певного моменту починає домінувати. Наприклад, квінтессенція зі змінним w , що мовібно зменшується, у минулому за своїми динамічними властивостями могла бути подібною на звичайну матерію або випромінювання, але з часом переходить до стану, подібного до вакуумних полів ($w=-1$). Світ з такою темною енергією вічно розширюватиметься з прискоренням так, що масштаби в ньому збільшуватимуться за експоненціальним законом. І навпаки, квінтессенція із зростаючим w в ранньому Всесвіті за своїми динамічними властивостями була подібна до космологічної сталої. У такій моделі з часом «космологічне прискорення» зміниться «космологічним сповільненням», яке зупинить розширення світу і приведе до подальшого колапсу, який вже ніщо не зупинить. Такий світ є скінченим в часі і його існування закінчиться повним колапсом, так званим Великим Колапсом (Big Crunch) [3].

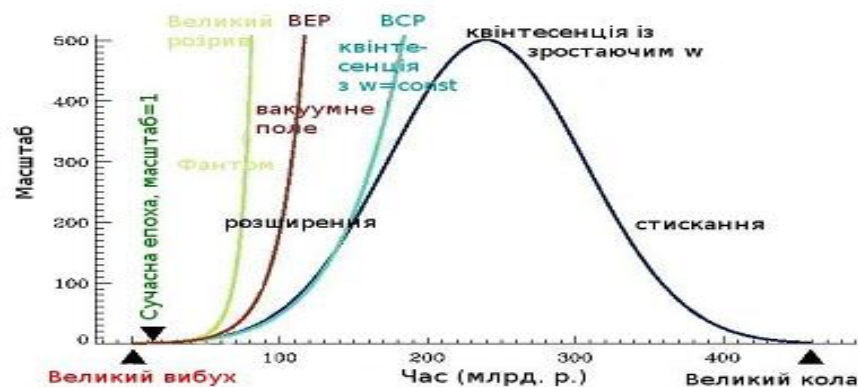


Рис.4. Залежність масштабів від часу в різних моделях темної енергії. Скорочення: BER - вічне експоненціальне розширення, BCP - вічне степеневе розширення.

Фантом. Параметр рівняння стану w завжди менший -1 і може бути постійним або змінюватися з часом. Густина енергії фантома повільно зростає з часом від нуля до дуже великих значень в майбутньому, унаслідок чого його роль, як джерела «космічного відштовхування» виявлятиметься на все менших і менших масштабах - з часом розпадуться скупчення галактик, потім галактики, далі зорі, планети, атоми і елементарні частинки — все закінчиться Великим Розривом (Big Rip), причому за скінчений час. І хоча він і дуже великий, віддалене майбутнє такого світу надто вже похмуре. Перехід w через -1 як для квінтесценції, так і для фантома заборонений, але в арсеналі теоретиків є також моделі темної енергії, параметр рівняння стану для яких змінюючись може переходити через -1 , так звані квінтом, к-есенція та ін.

На рисунку 4 приведені залежності масштабу від часу для декількох моделей темної енергії з реалістичними параметрами. Час даний в мільярдах років, вік сучасного Всесвіту - 14 млрд. років - показаний трикутником зліва внизу.

Важливою властивістю моделей темної енергії є також їх гравітаційна нестійкість - здатність до розвитку збурень густини енергії, які впливають на формування великомасштабної структури Всесвіту. У кожній моделі такий вплив є різним, що залежить від його фізичних властивостей. Це дає можливість розвивати спостережувальні тести, які б дозволили встановити фізичну природу темної енергії нашого світу за характерними «відбитками пальців» кожної з

них у великомасштабній структурі Всесвіту. Цим сьогодні інтенсивно займаються багато наукових груп в різних країнах світу. У більшості життєздатних моделей збурення густини темної енергії настільки малі на масштабах структур Всесвіту, що їх пряме виявлення сучасними спостережувальними засобами не є можливим [3].

Причиною тому - великий негативний тиск: чим більшою є локальна густина, тим більший негативний тиск, що обумовлює гравітаційне відштовхування і розгладжує локальну неоднорідність темної енергії. Таким чином, припущення про просторово-однорідний розподіл темної енергії обґрунтоване. Чи можна сьогодні щось сказати про мікрофізичні властивості таких моделей темної енергії? Як вже згадувалось, темна енергія майже однорідно заповнює весь Всесвіт, «пронизуючи» всі тіла і частинки, взаємодіючи з ними лише гравітаційно. З іншого боку, назвавши темну енергію фізичною субстанцією, слід хоча б спробувати пояснити її з позицій сучасної фізики. Питання 1-ше, на який хочеться мати відповідь мовою фізики: оскільки причиною прискореного розширення є негативний тиск, то яким є фізичний механізм, що забезпечує такий тиск в кожній точці простору? [3].

Передбачається, що темною енергією є нове поле, величина якого описується простою (скалярною) функцією координат і часу. Його повна густина енергії є сумою густини кінетичної і додатньої потенціальної енергії. Остання описує дію поля на самого себе. В процесі еволюції скалярне поле з позитивною густиною потенціальної енергії скочується в стан з меншою густиною потенціальної енергії, що є загальною властивістю всіх фізичних систем і полів. Але властивості поля мають бути такими, щоб скочування відбувалося повільно: кінетична енергія не повинна перевищувати потенціальну. Це забезпечує негативність тиску, оскільки він дорівнює різниці густин кінетичної і потенціальної енергій. Таке може бути, коли потенціал поля, що описує самодію поля, буде досить пологим. Решту робить гравітація: всі частинки і поля рухаються по геодезійних (найкоротших) траєкторіях в просторі-часі, що і призводить до прискореного розширення однорідного ізотропного світу. Питання 2-ге: якщо темна енергія є полем, то які частки є носіями цього поля? На жаль, поки не вдається побудувати життєздатну модель темної енергії в рамках теорії елементарних частинок і фундаментальних взаємодій, яка повинна відповісти на це питання. Причиною тому є дуже низька густина поля, з чого випливає, що, наприклад, у випадку квінтесенції маса частинок, яка їй відповідає за квантово-механічними розрахунками, має бути $\sim 10^{-33}$ eV.

У сучасній фізиці елементарних частинок таких мас немає. Маса електрона, найлегшої стабільної частинки дорівнює $5 \cdot 10^5$ eV, тобто, є на 38 порядків більшою. Розмір елементарних частинок визначається комптонівською довжиною хвилі: для електрона вона рівна $2.4 \cdot 10^{-10}$ см, а для частинки космологічного скалярного поля $\sim 10^{29}$ см, тобто, більша за розмір спостережуваної області Всесвіту ($\sim 10^{28}$ см). Це і пояснює труднощі квантової інтерпретації таких полів і ще раз підкреслює їх нову фізичну сутність [3].

Модифікації і узагальнення гравітації. Інший підхід до пояснення прискореного розширення Всесвіту заснований на узагальненні або модифікації

гравітації — лівій частині рівнянь Айнштайна (темна енергія, яку ми обговорювали до цього часу, відноситься до їх правої, матеріальної частини). У ньому передбачається, що в світі є лише звичайна речовина та темна матерія, а прискорене розширення Всесвіту - результат гравітації з інших просторових вимірів або іншої гравітації нашого 3+1 мірного світу. Цей підхід має свою історію, яка, як і космологічна стала і фрідманівська модель Всесвіту, почалася в 20-х роках минулого століття. Історично першою і простою формою модифікованої гравітації є та сама космологічна стала, якщо її записувати не в правій матеріальній, а в лівій частині рівнянь загальної теорії відносності. Саме туди її і ввів Айнштайн. Але тоді виходить казус, що перечить духу ОТО — простір викривлений навіть тоді, коли в ньому немає матерії або енергії. Саме тому її перенесли в праву частину і асоціювали з енергією вакууму. Подальша її історія нам вже відома... [3].

Жодна з фізичних теорій не мала стількох опонентів та бажаючих переписати її по-іншому, як загальна теорія відносності Айнштайна. Але жодна з її альтернатив не може порівнятися з нею в красі, елегантності, стрункості і точності узгодження з експериментальними даними на Землі і в космосі. Створена для опису фізичних явищ в просторі-часі спостережуваного світу, вона, тим не менше, не обмежена трьома просторовими координатами і однією часовою. Її рівняння внутрішньо не суперечливі в просторі-часі будь-якої розмірності, але передбачення можуть перечити спостереженням і експериментальним тестам. Існують все ж вдалі узагальнення і розширення на більше число вимірів, що узгоджуються з експериментальними тестами в межах Сонячної системи і здатні пояснити прискорене розширення Всесвіту.

Основною проблемою при цьому є фізична інтерпретація додаткових розмірностей.

Теорії Калуци-Кляйна і бран. Вперше теорія гравітації для 5-вимірного простору була побудована Калуцою і Кляйном в 1921-1926 рр. з метою пояснити з єдиних фізичних принципів гравітацію і електромагнетизм. Це їм майже вдалося, але відкриття сильної і електрослабкої взаємодій показало, що ця теорія неповна і число просторових вимірів необхідно збільшувати. Сучасні теорії працюють з 10, 11, 26 та більшим числом просторових вимірів з метою об'єднання всіх взаємодій, включаючи гравітацію. Але ми живемо в 3-х мірному просторі і одновимірному часі та не фіксуємо наявності інших вимірів. Цю очевидну спостережувальну властивість нашого світу автори різних модифікацій таких теорій пояснюють різними способами. Історично першим є такий: всі «зайві» просторові виміри компактифіковані і мають складну топологію (сфери, тора і ін.) з діаметрами від масштабу Планка (10^{-33} см) до масштабу Фермі (10^{-17} см). Але такі малі масштаби поки-що недоступні вивченню засобами сучасної експериментальної фізики. У звичайних умовах вони проявляють себе як квантові числа (степені свободи) елементарних частинок - заряд, спин, колір і т.д. Щоб «заглянути» в ці простори, потрібна величезна енергія, оскільки таким малим довжинам хвиль відповідають величезні енергії.

До нижньої межі енергій (верхньої межі масштабів, масштабу Фермі) підбирається Великий адронний колайдер і, можливо, вже найближчим часом

звідти буде отриманий якийсь сигнал... У іншому способі пояснення не спостережності «зайвих» вимірів, вважається, що всі виміри рівноправні, але спостережувані нами фізичні поля і взаємодії якимось чином прив'язані лише до чотиривимірної гіперповерхні, яку називають браною (від слова мембрана). Сьогодні активно розвиваються декілька варіантів теорії бран (p-, D-, M-брани), що обіцяють відкрити нам незвичайні властивості світу в інших вимірах. Теорії бран тісно пов'язані з теоріями струн, суперструн і супергравітації, здатних об'єднати і пояснити всі чотири фізичні взаємодії нашого світу (електромагнітну, сильну, слабку і гравітаційну). У них, наприклад, частинки нашого світу представляються його перетином одновимірними струнами, які вібрують на певних частотах. Багато властивостей нашого світу в таких моделях з'являються природньо, у тому числі і прискорене розширення Всесвіту. На малих масштабах в наших вимірах переважає гравітація нашого 3+1 світу, а на великих проявляється гравітація інших вимірів, яка, в разі повільної зміни масштабів в них, приводить до прискореного розширення спостережуваного Всесвіту. Ефективно в наших вимірах вона діє як космологічна стала, яка в цьому випадку може ще і змінюватися з часом. Причому, це працює вже в моделі з мінімальним розширенням розмірності простору — в 5-ти мірному світі Калуци-Кляйна [3].

Теорія Бранса-Дікке. Загальна теорія відносності - це метрична теорія гравітації, в якій роль потенціалів гравітаційного поля відіграють компоненти метричного тензора, що визначає геометричні властивості простору-часу. Поля як такого в ній немає, є викривлення простору-часу матерією-енергією, а гравітація повністю описується тензором кривини Рімана. Не всім фізикам така інтерпретація гравітації була до душі, тому робилися багатократні спроби опису гравітації в термінах класичної теорії поля у викривленому просторі-часі. Найбільш вдалою є теорія гравітації Бранса-Дікке, яка запропонована у 1961 році, та її варіанти розвитку. Це інший напрям узагальнень загальної теорії відносності. У них окрім метричного тензора є ще скалярне поле, що генерується матерією, через яке вона впливає на метрику простору-часу. У цих теоріях відома нам стала всесвітнього тяжіння вже не постійна величина, а така, що змінюється у просторі та часі. Параметром теорії є безрозмірна константа зв'язку, який визначає також її міру відхилення від загальної теорії відносності. Її визначення в експериментах за допомогою супутника Кассіні-Гюйгенс в 2003 р. показали, що теорії Бранса-Дікке практично не відрізняються від теорії Айнштейна в локальних експериментах, тому число їх прибічників невелике. Останніми роками інтерес до них зріс, у зв'язку з можливістю пояснення в рамках цих теорій виявленого прискореного розширення Всесвіту. Виявилось, що доповнивши теорію Бранса-Дікке деякою функцією від того ж потенціалу можна задовольнити і локальні і космологічні тести. У цьому підході прискорене розширення Всесвіту пояснюється складнішою гравітацією звичайної речовини і темної матерії [3,4].

Нелінійна або $f(R)$ гравітація. Третій напрям узагальнень теорії гравітації, який сьогодні активно розвивається, це - гравітація вищих порядків за скаляром кривини простору-часу R . Річ у тому, що рівняння Айнштейна, що описують гравітацію як викривлення простору-часу, еквівалентні заданню

певної функції, яку називають лагранжіаном, і застосування до нього стандартної техніки виведення рівнянь руху у викривленому просторі-часі. У теорії Айнштейна ним є скаляр кривини R , тобто, найпростіша яка лише може бути лінійна залежність лагранжіана від скаляра кривизни 4-простору. У цьому сенсі теорія Айнштейна лінійна і найпростіша. Природньо, що теоретикам цікаво розглянути складніші залежності і застосувати їх до опису явищ нашого світу. Наприклад, включення квадратичного члена $R + \alpha R^2$, де α — деяка константа, забезпечує інфляційну стадію в ранньому Всесвіті без введення спеціального інфлатонного поля. Але в сучасну епоху, коли скаляр кривини R малий за величиною (і R^2 істотно менше за R), воно нічого не дає і ця теорія практично не відрізняється від теорії Айнштейна і не може пояснити прискореного розширення Всесвіту без введення темної енергії. Варіантів ускладнень форми лагранжіана відкрита множина, досліджено всього лише декілька [13].

Сучасні визначення параметрів темної енергії .

Насправді ж, експериментальне виявлення прискореного розширення нашого Всесвіту за надновими типу Ia значно складніше і трудомісткіше завдання, ніж може здатися з викладеного вище. Необхідно враховувати велике число факторів для кожної надгової, які впливають на виміряні значення потоків випромінювання в різних спектральних діапазонах, форму кривої блиску, міжзоряне та міжгалактичне поглинання і т.п. І не все цілком ясно як. Дискусії продовжуються серед фахівців в цій області з питань обліку тонких ефектів для підвищення точності. Основний же результат сумнівів не викликає навіть в закоренілих скептиків. До сьогоднішнього дня різними групами дослідників, включаючи любителів астрономії, відкрито вже близько тисячі наднових до червоних зміщень ~ 2 . Нові дані підтвердили і уточнили перші результати і висновки [6].

Інший клас об'єктів, що підтверджують це відкриття - гамма-спалахи. Для 63 з них знайдені оптичні джерела, за якими визначені їх червоні зміщення. Виявилось, що 30 з них мають істотно більші червоні зміщення, ніж наднові. Максимальне дорівнює приблизно 5.6. Залежність «потік енергії — червоне зміщення» для них, відкалібрована за надновими, підтвердила переваги моделі з темною енергією за далекими гамма-спалахами. Важливість цих даних полягає в розширенні просторових масштабів спостережуваних даних, які вказують на існування темної енергії.

Проте, необхідні перевірки, які засновані на інших тестах і класах об'єктів. Таким міг би бути тест «видимий кутовий розмір — червоне зміщення», суть якого полягає у визначенні відстані до об'єкту відомих лінійних розмірів за вимірами їх кутових розмірів. По аналогії з «стандартною свічкою», об'єкти відомих лінійних розмірів називають «стандартним метром». Однак, ні галактики, ні їх скупчення не мають чітких меж — яскравість поступово спадає від центру до краю і кутові розміри змінюються з відстанню не лише через геометричний ефект, але і через фотометричний, і, тим самим, не можуть служити «стандартним метром». Проте вирішення проблеми було все ж знайдено...

Таким «стандартним метром» є лінійний розмір плям на карті флюктуацій температури реліктового випромінювання, яке приходить до нас із сфери останнього розсіювання, що знаходиться на червоному зміщенні ~ 1100 і відстані ~ 14000 Мпк. Перші виміри їх кутових розмірів були проведені в 2000 році в стратосферних експериментах BOOMERanG і MAXIMA. Вже вони показали, що характерні кутові розміри таких плям добре узгоджуються з космологічною моделлю, в якій кривина 3-простору близька до нуля, а за густиною зараз домінує темна енергія. Остаточного це підтвердив космічний експеримент WMAP, в якому отриманий кутовий спектр потужності флюктуацій температури реліктового випромінювання всього неба. Характерні кутові розміри плям, отримані в цьому експерименті, становлять ~ 0.6 градуса. Лінійні і кутові розміри узгоджуються між собою в моделях, в яких доля темної енергії складає приблизно 70%. Таким чином було отримано незалежне підтвердження існування темної енергії [9].

Інші докази існування темної енергії отримані за даними вивчення великомасштабної структури Всесвіту та її елементів. Існування дуже масивних скупчень галактик, що знаходяться на червоних зміщеннях ~ 1 (відповідає відстані близько 10 мільярдів світлових років і віку Всесвіту ~ 4 млрд. років), можливо лише в моделях з темною енергією. Форма і амплітуда спектру потужності збурень щільності речовини, що визначається за розподілом галактик в просторі, однозначно вказують на існування темної енергії і темної матерії в пропорції приблизно 7 до 3 відповідно.

Якщо визначати космологічні параметри за сукупністю всіх спостережуваних даних, то склад нашого Всесвіту такий: темна енергія – 72%, темна матерія – 23%, баріонна речовина – 5%. Сучасна точність і надійність визначення цих величин настільки висока, що існування темної енергії вважається доведеним фактом. Складніше з визначенням величини параметра рівняння стану w . Поки встановлено лише те, що з вірогідністю 95% (критерій 2σ) сучасне значення w знаходиться в інтервалі від -1.2 до -0.8. Яким воно було у далекому минулому — сучасними даними визначається ненадійно. Тому, кожна з моделей темної енергії, розглянутих тут, поки має право на життя [10].

Космологи сподіваються, що дані, які вже збрала Космічна обсерваторія Планк і ще збере до завершення своєї місії, після відповідної обробки істотно звужить область допустимих значень параметрів темної енергії і, можливо, класів її моделей. Це перспектива найближчих 2-3 років. В цей же час запрацює на повну потужність Великий адронний колайдер, який, як сподіваються великі оптимісти, проллє трохи світла в це царство темряви, — темної енергії, темної матерії і неспостережуваних просторових вимірів. Помірні ж оптимісти проектують нові телескопи, планують спеціальні програми спостережень та вдосконалюють методи їх обробки [5,7,12].

У стадії розробки перебуває проект космічного телескопа Зонд прискорення за надновими (Supernova Acceleration Probe, SNAP), завданням якого буде систематичний пошук наднових з метою встановлення залежності параметра рівняння стану темної енергії від часу, що дозволить встановити її природу. Очікується, що він зможе щороку виявляти близько 2000 наднових. Якщо цей проект буде прийнятий до виконання, то його запуск може відбутися

близько 2020 року. У США почалися роботи із створення Великого синоптичного оглядового телескопа (Large Synoptic Survey Telescope, LSST), який буде встановлений на вершині Серро Пачун (Cerro Pachón, 2682 м) на півночі Чилі. З діаметром дзеркала 8.4 м, полем зору 3.5 градуса і 3.2 гігабайтною цифровою камерою він зможе двічі за тиждень сканувати всю доступну частину неба. Головними завданнями телескопа будуть виявлення спалахів наднових і ефектів слабкого гравітаційного лінзування для встановлення природи темної енергії і темної матерії. Планується, що перше світло зір він зареєструє вже в 2015 році [6].

Європейська південна обсерваторія після багатолітньої роботи над проектом Європейського екстремально великого телескопа (European Extremely Large Telescope, E-ELT) з діаметром головного дзеркала 42 м цього року планує вже приступити до його створення. Він будуватиметься на вершині Серро Армазонес (Cerro Armazones, 3060 м) яка знаходиться в центральній частині високогірної чилійської пустелі Атакама. До кінця поточного десятиліття він повинен би вже почати спостереження. У проектних обґрунтуваннях необхідності створення такого телескопа - можливість прямого виміру прискорення розширення Всесвіту і варіації в часі фундаментальних фізичних сталих.

Пошук інформації для дослідження темної енергії у мережі Інтернет. Для дослідження наукової інформації через мережу Інтернет необхідно опрацювати сучасну наукову інформацію доступну на сайтах : NASA, ESA, the Hubble Heritage Team (STScI/AURA), J. Blakeslee (NRC Herzberg Astrophysics Program, Dominion Astrophysical Observatory), H. Ford (JHU). Сторінки доступу (<http://www.nasa.gov/>, <http://www.esa.int/ESA> , <http://mechafushigi.com> , <http://www.sciencedaily.com>) .

Аналіз результатів спостережень темної енергії відображених у дослідницькій роботі .

Аналізуючи результати спостережень необхідно зробити декілька зауважень термінологічного характеру. Часто в літературі та описі темної енергії як фізичної субстанції використовуються терміни «антигравітація», «гравітаційне відштовхування», «космічне відштовхування» і тому подібне [4]. Насправді ж, ми не розглядали якісь нові сили, що діють на звичайну матерію і мають протилежний до гравітаційного тяжіння знак. Ефект прискорення розширення однорідного Всесвіту впливає із загальної теорії відносності, в якій немає сили притягання, або відштовхування, а є викривлення простору-часу масою або енергією (див.Рис.3), а частинки рухаються в ньому вільно по геодезійних траєкторіях. Прискорення або силу можна розрахувати за зміною швидкості частинок в кожній точці простору в локальній інерціальній системі відліку. У такому ключі і слід розуміти ці терміни.

Джерела інформації мережі Інтернет рекомендовані для використання щодо дослідження темної енергії

Для дослідження темної енергії через мережу Інтернет рекомендуємо використовувати результати спостережень провідних інститутів та обсерваторій світу, включаючи обсерваторії південної півкулі:

- **Національна оптична астрономічна обсерваторія** (NOAO, США): <http://www.noao.edu/noao.html> . Через цей сервер можна вийти на сторінки знаменитих обсерваторій Маунт Вілсон, Маунт Паломар і Кат Пік.
- **Національна радіоастрономічна обсерваторія** (NROO, США): <http://www.nrao.edu/>.
- **Інститут космічного телескопа ім. Хаббла** (STSc, США): <http://marvel.stsci.edu/>.
- **Обсерваторія ім. В. М. Кека** (США, Гавайські острови). Має два найбільших на сьогодні оптичних телескопи із сегментованими 18-метровими дзеркалами: <http://astro.caltech.edu/>.
- **Центр астрофізики Гарвардського університету** (Cf, США): <http://cfa-www.harvard.edu/>.
- **Національний астрономічний і іоносферний центр в Аресібо** (NAIC, США): <http://www.naic.edu/>.
- **Сонячна обсерваторія Біг Бер** (BBSO, США): <http://www.bbso.njit.edu/>.
- **Обсерваторія Сьєрро Тололо** (СТІО, Чилі): <http://www.ctio.noao.edu/>.
- **Південна європейська обсерваторія** (ESO): <http://www.eso.org/>.
- **Англо-Австралійська обсерваторія** (ААО, Австралія): <http://www.aao.gov.au/>.
- **Радіоастрономічна обсерваторія Джодрелл Бенк** (Англія): <http://www.jb.man.ac.uk/>.
- **Група ім. І. Ньютона** (ING, о. Ла-Пальма, Канарські острова): <http://www.ing.iac.es/>.
- **Об'єднаний астрономічний центр** (Гавайські острови): <http://www.jach.hawaii.edu/>.
- **Інститут астрономії товариства Макса Планка** (МРІА, ФРН, Гайдельберг): <http://www.mpia-hd.mpg.de/>.
- **Інститут астрофізики товариства Макса Планка** (МРА, ФРН, Гархінг): <http://www.mpa-garching.mpg.de/>.
- **Інститут радіоастрономії товариства Макса Планка** (Бонн, Німеччина MPIf): <http://www.mpifr-bonn.mpg.de/>. Має найбільший повноповоротний радіотелескоп з діаметром дзеркала 109 м.
- **Інститут астрономії Віденського університету** (Австрія): <http://www.astro.univie.ac.at/>.
- **Обсерваторія Блакитного берега** (ОСА, Франція): <http://www.obs-nice.fr/>.
- **Обсерваторії Маунт Стромло і Сайдінг Спрінг** (Австралія): <http://msowwww.anu.edu.au/>.
- **Південно-Африканська астрономічна обсерваторія** (ПАР): <http://www.sao.ac.za/>.

▪ *Національна астрономічна обсерваторія Японії (NAOJ):*
<http://www.nao.ac.jp/> .

Після дослідження темної енергії через мережу Інтернет необхідно підготувати висновок та звіт про проведену роботу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дж. Острайкер, П. Стейнхард. Всесвіт п'ятої сутності — квінтессенція. «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. Б. Новосядлий. Темна енергія — загадка сторіччя. Журнал «Світ фізики», 2007, №4, с.3-9.
4. Б. Новосядлий. Основи і становлення сучасної космології. Журнал «Педагогічна думка», 2004, №2, с. 3-12.
5. В. Лукаш, Е. Михеева. Тёмная энергия Вселенной. «Вокруг света», 2008, №9 (2816), с. 55
6. Веб-сайт «Астрономічні новини NASA. Новини космосу.» [Електронний ресурс].—Режим доступу: <http://www.nasa.gov/> - (Сайт астрономічних новин)
7. Веб-сайт «uareferat» [Електронний ресурс].—Режим доступу: <http://uareferat.com> Темна матерія і темна енергія у Всесвіті лекція Рубако в (темна енергія у Всесвіті лекція Рубаков)
8. Веб-сайт «Космічного агенства DLR» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.dlr.de> – (Космічне агенство DLR)
9. Веб-сайт «Кафедра астрономії та фізики космосу» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://space.univ.kiev.ua/viewpage.php?page_id=1/ – (Кафедра астрономії та фізики космосу, Фізичний факультет, Київський національний університет імені Тараса Шевченка)
10. Салата С.А. Програмний комплекс для чисельного моделювання гравітаційного моделювання // Вісник Київського університету. Астрономія – 2000. – №37. – С.19-22.
11. Schneider P., Ehlers J., Falco E. Gravitational lensing. - New York: Springer, 1992. - 435 p.
12. Kayser R., Refsdal S., Stabell R. Astrophysical applications of gravitational microlensing // Astron. Astrophys. - 1986. - №166. - P. 36-52.
13. Wambsganss J. Gravitational Microlensing: Ph.D. thesis. - Мьнchen, 1990. - 15p.
14. Shao M. SIM: the space interferometry mission // Proc. SPIE. - 1998. - №3350. - P. 536-540.
15. Hog E., Novikov I.D., Polnarev A. MACHO photometry and astrometry // Astron. and Astrophys. - 1995. - Vol. 294, №1. - P.287-294.
16. Walker M. Microlensed image motions // Astrophys. J. - 1995. - V.453. - P.37-39.

17. Han C. Additional information on from astrometric gravitational microlensing observations // ASP conference series. - 2000.
18. Williams L., Saha P. Improper motions in lensed QSOs // Astron. J. - 1995. - V.110. - P. 1471.
19. Lewis G., Ibata R. Quasar image shifts due to gravitational microlensing // Astrophys. J. - 1998. - №501. - P. 478.
20. Zhdanov V.I., Zhdanova V.V. Analytical relations for time-dependent statistical microlensing // Astron. Astrophys. - 1995.- V. 299. - P.321-325.
21. Zhdanov V.I. The general relativistic potential of astrometric studies at microarcsecond level // Astronomical and astrophysical objectives of sub-milliarcsecond optical astrometry / Eds. E. Hog, P. K. Seidelmann. – Dordrecht: Kluwer, -1995- P.295-300.
22. Sazhin M.V., Zharov V.E., Volynkin A.V. and Kalinina T.A. Microarcsecond instability of the celestial reference frame // Mon. Not. R. Astron. Soc. - 1998. - V. 300. - P. 287-291.
23. Mao S., Witt H. Extended source effects in astrometric gravitational microlensing // Mon. Not. R. Astron. Soc. - 1998. - №300. - P. 1041.