

# Основи і становлення сучасної космології

Б. Новосядлий

*Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету  
імені Івана Франка, вул. Кирила і Мефодія, 8, 79005 м. Львів*

## Анотація

В статті робиться спроба огляду стану сучасних досліджень в галузі теоретичної та спостережувальної космології.

**Ключові слова :** космологія, космомікрофізика, походження галактик та великомасштабної структури Всесвіту, реліктове випромінювання

## 1 Вступ

Яким є наш Всесвіт? Як далеко простягаються звичні галактики і квазари? Як довго існує Світ, в якому ми живемо? Як Він виник? І яка Його доля – минула, сучасна, майбутня?

Ці та інші питання віддавна хвилюють вдумливих, є рушіями у пізнанні природи небесних об'єктів. І лише науці ХХ-го століття судилося знайти "дорогу, яка веде до храму" знань про структуру та еволюцію Всесвіту на основі сучасних фізичних теорій та експериментальних технологій. Відповіді на поставлені запитання вчені шукають сьогодні на стику фізики явищ у найменших масштабах, мікросвіту, та фізики явищ у найбільших - Мегасвіту, який включає масштаби від галактик до розмірів Всесвіту як цілого. Ця галузь знань сьогодні дуже активно розвивається як в плані теоретичних досліджень, так і в плані постановки експериментів та їх реалізації. Вона ще не має усталеної назви: "Фізична космологія", "КосмоМікроФізика", "Космологія і фізика елементарних частинок" найчастіше звучать у назвах наукових конференцій та їх праць, напрямків досліджень і навчальних програм для молодих науковців. Основи чи принципи цієї галузі знань можна знайти у монографіях, підручниках, посібниках та науково-популярних виданнях, які вийшли і виходять за кордоном і практично недоступні студентам, аспірантам і науковцям в Україні. Прикладом таких книг можуть бути [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7], в яких викладені основи цієї галузі знань, яку називатимемо сучасною космологією. В цій короткій статті я можу змалювати лише основні досягнення сучасної космології, яка є уже надбанням духовної культури нашого суспільства, етапи її становлення та проблеми, над якими ще працюють учені.

## 2 Спостережувальні основи сучасної космології

На основі спостережень, експериментів та фізичних теорій, перевірених в лабораторіях, можна сформулювати фундаментальні властивості нашого Всесвіту, які лежать в основі сучасної космології:

1) **Нестаціонарність** спостережуваного Всесвіту: він розширюється згідно закону Габбла  $v = H_0 r$ , що проявляється у явищі розбігання галактик, яке реєструється за зміщенням ліній у їх спектрах. Приблизно  $t_0 \sim H_0^{-1}$  років тому, коли вся спостережувана у Всесвіті речовина була зібрана в кульці діаметром

$\sim 1$  см і перебувала у надщільному стані, "стався Великий вибух", з якого розпочалось розширення.

2) **Ізотропність** просторового розподілу позагалактичних об'єктів, властивостей світної речовини та значень фізичних констант.

3) **Однорідність** (за масовою густиною, морфологічними типами, співвідношенням хемічних елементів) просторового розподілу галактик у великих масштабах ( $\geq 10h^{-1}Mpc$ ). З ростом масштабу згладжування локальні відхилення параметрів від середніх зменшуються.

4) **Структурованість** Всесвіту на масштабах  $\leq 100h^{-1}Mpc$ . Елементами структури є галактики, групи галактик, скупчення, надскупчення, великі порожнини і чарункова структура Всесвіту.

5) **Існування реліктового випромінювання**, планківський розподіл якого вказує на "гарячий початок" Великого вибуху та визначальну роль цього випромінювання у динаміці розширення Всесвіту на ранніх етапах його еволюції.

6) **Висока ізотропія реліктового випромінювання** - відхилення параметрів енергетичного розподілу від середніх не перевищує тисячних долей відсотка у всіх кутових масштабах, включаючи масштаби більші розмірів причинно-зв'язаних областей на момент космологічної рекомбінації, коли воно "відірвалось" від речовини.

7) **Сталість відношення вмісту гелію та його ізотопів до вмісту водню** у зорях, галактиках і квазарах вказує на їх космологічне (дозоряне) формування.

8) **Евклідовість 3-простору нашого Всесвіту**. Кривина всього доступного для спостережень 3-простору близька до нуля. В минулому таке відхилення, якщо воно є взагалі, було ще меншим. Проте в надщільному стані початку Великого вибуху ймовірність реалізації саме такого одного значення кривини у величезному числі причинно незв'язаних областей є надзвичайно малою. Вказує на існування фізичних процесів в ранньому Всесвіті, які "розгладжували первинні складки", зумовлені квантовими властивостями матерії та просторучасу у планківських масштабах.

9) **Відсутність магнітних монополів** на Землі та ознак їх можливого існування в ближньому і далекому космосі. Їх існування передбачається більшістю теорій Великого об'єднання, які узгоджуються із даними експериментів на сучасних прискорювачах елементарних частинок.

10) **Наявність темної матерії**, яка проявляє себе тільки гравітаційним впливом на розподіл та рух світної речовини в галактиках, скупченнях галактик, у міжгалактичному просторі. Масова густина цієї складової матерії значно більша світної речовини. Природа її невідома.

11) **Зростання темпу розбігання галактик**, яке спостерігається по наднових Ia, вказує на існування "космологічної гравітаційно відштовхуючої сили". Вона переважає самогравітацію речовини, яка сповільнює розширення, і вказує на існування силового поля, або темної енергії невідомої природи.

Ці та інші фундаментальні властивості нашого Всесвіту лягли в основу сучасних космологічних моделей. Їх основними рисами є: **i)** сучасний стан розбігання галактик описується рівняннями Айнштейна для однорідного ізотропного Всесвіту, заповненого звичайною баріонною речовиною, випромінюванням, темною матерією, яка кластеризується, та темною енергією, яка не кластеризується; **ii)** на ранньому етапі еволюції Всесвіт пройшов через фазу дуже швидкого (експоненціального) розширення, яка наближено описується моделлю де Сіттера і

називається інфляційною стадією; **iii**) спостережувана область Всесвіту розвинулась із однієї причинно-зв'язаної перед початком інфляції області простору часу, яка розтягнулась в період інфляції та в наступну епоху космологічного розширення до розмірів сучасного горизонту частинки чи значно більших; **iv**) спостережувана великомасштабна структура Всесвіту є наслідком розвитку квантових флюктуацій метрики простору-часу, згенерованих до чи в період інфляції і розтягнутих до сучасних спостережуваних масштабів.

### 3 Основні етапи становлення сучасної космології

Теоретичні основи сучасної фізичної космології були закладені на початку ХХ-го століття. Цей період був означений кризою класичної фізики та створенням основ нової фізики — теорії відносності та квантової фізики. В той самий час зароджувалась позагалактична астрономія: галактики ще не були відкритими, але їх образ уже витав в умах астрономів. Уявлення про Всесвіт були досить спекулятивними. Його уявляли як острів зірок, оточений нескінченним і незмінним у часі простором. Нескінченність Всесвіту і його незмінність у часі постулювалися як філософські принципи.

Айнштайн першим у 1917 році застосував рівняння загальної теорії відносності, "вгадані" ним у 1916р. [8]

$$R_{ik} - \frac{1}{2}g_{ik}R = \kappa T_{ik} \quad (1)$$

(в яких ліва частина визначена 4-тензором кривини Річчі  $R_{ik}$  і метричним тензором  $g_{ik}$  простору-часу, а права - тензором енергії-імпульсу "гравітуючої" речовини  $T_{ik}$ ) до аналізу динаміки Всесвіту як цілого. В [9] він здійснив аналіз на предмет існування стаціонарних розв'язків для однорідного ізотропного Всесвіту. На його велике здивування і всупереч його філософським переконанням рівняння не мало таких розв'язків, а отже виявилось несумісним із уявленням про незмінність Всесвіту у часі, його "вічність". Цього для Айнштайна було достатньо, щоб "руками підправити" рівняння - ввести в праву частину тензор енергії-імпульсу "антигравітуючої" речовини. (Під "гравітуючою" речовиною слід розуміти таку, яка самопритягується, а під "антигравітуючою" таку, що "саморозштовхується".) Для цього він дописав у рівняння константу, яка проявляла себе тільки на космологічних масштабах і начебто забезпечувала стаціонарність - зрівноважувала самопритягання матерії. Так вперше було запропоновано гіпотезу про космологічну константу. Їй судилася "драматична доля" - до неї ще не раз поверталися для вирішення проблем узгодження теорії і спостережень і відкидали, коли знаходили простіше пояснення. Проте, вона пережила свого творця і ХХ-е століття... Російський математик Олександр Фрідман в 1922-ому році довів [10], що стаціонарні розв'язки не властиві ні рівнянням Айнштайна 1916-го року, ні його "підправленому" рівнянню 1917-го. О. Фрідман вперше на основі рівнянь Айнштайна записав повну систему рівнянь еволюції однорідного ізотропного Всесвіту, розв'язав їх і довів, що такий Всесвіт є нестаціонарним. Айнштайн згодом визнав свою помилку, назвавши ідею введення космологічної сталої найбільшою помилкою свого життя. Моделі Фрідмана дотепер є основою теорії будови і еволюції Всесвіту.

Теоретичний висновок про нестаціонарність Всесвіту, його еволюцію, мав на той час революційне світоглядне значення і викликав жваві дискусії. Йо-

го підтвердження через кілька років Габблом [11] у перших спостереженнях явища розбігання галактик зіграло вирішальну роль для загального прийняття еволюційної моделі. Важливим було не тільки відкриття розбігання, але й встановлення лінійної залежності швидкості віддалення галактики від відстані до неї з коефіцієнтом пропорційності однаковим у всіх напрямках і всюди — сталою Габбла:

$$v = H_0 \cdot l. \quad (2)$$

Аналізуючи ті перші експериментальні дані про червоне зміщення ліній в спектрах не дуже то й далеких галактик, стає зрозуміло, що виявлення такої закономірності було практично випадковим внаслідок низької достовірності результатів тогочасних спостережень. Лінійність такої залежності вказує на трансляційну симетрію простору, тобто однорідність і ізотропність. А це - основне припущення чи принцип, на якому будується сучасна модель світу. Його називають ще космологічним принципом. Він отримав остаточне підтвердження спостереженнями у 2-ій половині ХХ століття. Звісно, однорідність та ізотропність простору має місце на великих масштабах, а на малих — панує очевидна неоднорідність структури у вигляді зір, галактик, скупчень галактик, порожнин в їх розподілі.

Один з висновків, котрі впливали з факту розширення — це існування сингулярного стану на початку розширення, який відразу став предметом жвавого обговорення. Але пояснити сингулярність довго не вдавалося.

У 1948-ому році Гамов [12] висунув ідею “гарячого Всесвіту”, щоб пояснити синтез важких елементів за надзвичайно короткий час життя Всесвіту — коло 4 мільярдів років, який впливав із завищених тогочасних оцінок сталої Габбла  $H_0 \simeq 500$  км/Мпк·с. Хоча покладені в основу розрахунків перерізи термоядерних реакцій були неточними, наявних відомостей стало достатньо для формування надзвичайно продуктивної ідеї. В рамках такої гіпотези середовище на ранніх стадіях мало перебувати у стані плазми з високими температурою і ступенем іонізації. З цього впливала необхідність існування великої концентрації реліктових фотонів, сучасна температура яких в 1956 році оцінювалась на рівні 5-6К. Цей мікрохвильовий космічний фон був зареєстрований в 1965-ому році випадково Пензіасом і Вільсоном [13] та інтерпретований як реліктове випромінювання. Його розподіл по частотах описується формулою Планка з температурою 2.726К, а його інтенсивність така, що число квантів в одиниці об’єму перевищує середнє число протонів в  $\sim 10^8$  разів!

З початком позагалактичних спостережень в 30-их роках було помічено, що швидкості галактик у скупченнях вказують на загальну масу скупчень значно більшу, аніж маса всієї світної речовини в них [14]. Невидима речовина отримала назву “темної”. З 70-их років аналогічну недостачу світної маси було помічено в зовнішніх областях спіральних галактик. До 80-их років під темною матерією мали на увазі звичайну речовину в невидимій формі, наприклад, газ, залишки зір, планети і т.д.

На початку 80-х років фізики-експериментатори запідозрили, що нейтрино мають масу спокою  $\sim 30$  еВ. Оскільки реліктових нейтрино по концентрації в  $\sim 10^8$  разів більше протонів, то цього достатньо щоб вони були тою темною матерією, якої бракує. На епоху рівності густини матерії і випромінювання швидкості нейтрино були близькі до релятивістських, тому такий вид темної матерії отримав назву гарячої. Але в межах моделі з гарячою темною речовиною, че-

рез великі довжини вільного пробігу таких частинок, не вдавалось задовільно кількісно описати процес формування галактик та спостережуваної великомасштабної структури Всесвіту. Хоча наступні експерименти не підтвердили такої величини маси спокою у нейтрино, експерименти кінця 90-х на нейтринному детекторі СуперКаміоканде [15] укріпили ті підозри і дали нижню межу на її значення  $\sim 0.04$  еВ. Верхня межа на масу спокою нейтрино  $\leq 1$  еВ на достатньо високому рівні достовірності ( $\geq 95.4\%$ ) встановлена на основі даних спостережувальної космології - просторового розподілу галактик, скупчень галактик, їх функції мас та ін. Це значить, що нейтрино може складати не більше 10% густини темної матерії. А решта  $\sim 85 - 95\%$ ?

Зі середини 80-их прогрес у фізиці елементарних частинок примножив "зоопарк" можливих кандидатів на темну матерію. Здобула популярність (і практично донині її утримує) холодна форма темної матерії, вперше запропонована П. Піблсом в 1982 р.[16]. Частинки цієї форми матерії дерелятивізувались під впливом розширення ще на ранніх стадіях еволюції Всесвіту, приймають участь у гравітаційній взаємодії і, можливо, слабкій. Ця модель темної матерії добре пояснює динаміку гало галактик, утворення галактик, скупчень галактик, їх властивості та спостережувану великомасштабну структуру Всесвіту. Але, на жаль, попри наявність багатьох гіпотетичних частинок як кандидатів на елементне наповнення цього виду темної матерії, реально таких частинок досі не детектовано. Попри їх досить загальні природні властивості (участь у гравітаційній і, можливо, слабкій взаємодіях, здатність кластеризуватися, утворюючи протяжні гало об'єктів через беззіткнювальний характер взаємодії на стадії колапсу) встановлено, що вони складають не менше 20 – 40% всієї густини енергії  $\epsilon$  (те саме, що й маси, оскільки  $\epsilon = mc^2$ ).

В 90-х роках астрофізики, озброївшись Космічним телескопом імені Габбла, реалізували тест видима зоряна величина - червоне зміщення. Його вдалося здійснити за допомогою наднових типу Ia, які можна виявляти в дуже далеких галактиках, і які, і це найважливіше, мають всюди однакові відомий блиск в момент спалаху і зміну блиску з часом. Результат виявився несподіваним: наш Всесвіт розширюється з прискоренням, тобто швидкість розбігання галактик не гальмується самогравітацією, як очікувалось, а навпаки - прискорюється. Яка сила "розпирає простір" і спонукає галактики до збільшення темпу розбігання? Космологи мали варіант відповіді вже давно - космологічна стала, запропонована Айнштайном ще в 1917р. Її роль в розширенні Всесвіту, "розпиранні простору" вперше була зауважена в роботах де Сіттера 1917р. [17]. Проте фізики-теоретики вперто, і не без доказово, аргументували безпідставність її введення у фізику. Після перших майже одночасних публікацій результатів тесту двома групами астрофізиків [18, 19] відношення до неї змінилось. Тепер космологічну сталу розглядають як підвид темної енергії, що розподілений однорідно, не кластеризується (не скупчується) та має постійну у часі та однакову у просторі густину енергії, яка характеризується певним незвичним феноменологічним рівнянням стану, котре пов'язує тиск середовища із густиною енергії:  $P = -\epsilon$ . Її можна інтерпретувати як нульові квантові коливання густини енергії вакууму (див. огляди [20, 21] та цитування в них).

Космологічна стала — перша спроба ввести у фізику нову сутність, яка заповнює Всесвіт і "розпирає" простір. Останнім часом до космології увійшов новий термін "квінтесенція" або "пята сутність" на означення форми енергії, яку в найпростішому випадку феноменологічно можна описати за допомогою космо-

логічної константи. Таке введення дає змогу узгодити низькі динамічні оцінки густини зі спостережуваною плоскістю 3-простору.

На основі даних про блиск наднових Ia в кількох десятках далеких галактик, отриманих в експериментах Supernovae Cosmology Project і Supernovae Survey, даних про флюктуації температури реліктового випромінювання, отриманих в космічному експерименті WMAP, низки даних інших програм спостережувальної космології вказують на те, що густини баріонів, холодної темної матерії та темної енергії співвідносяться як 1:6:13. Отже, наш Всесвіт - це світ, в якому домінують по густині темна матерія і темна енергія ще не встановленої природи.

Активне дослідження фізичних процесів у гарячому Всесвіті поряд зі швидким розвитком ядерної фізики та теорії елементарних частинок у 60–80-их роках призвело до постановки питання про природу первинного стану і причини початку розширення. Поряд з тим вимагали пояснення фундаментальні властивості нашого Всесвіту, описані у Вступі. Це вилилось в елегантну теорію інфляційного Всесвіту, започатковану в кінці 70-х – на початку 80-х років в роботах Старобінського [22, 23], Гуса [24], Лінде [25] і ін. Згідно цієї теорії енергія Всесвіту до початку розширення була сконцентрована у скалярному полі із густиною енергії близькою до планківської, яке перебувало в метастабільному стані. Спонтанний перехід до стану істинного вакууму з мінімумом енергії (який прагне зайняти кожна фізична система) призводить до експоненціального розширення. Теорія інфляції досягнула успіху, пояснивши практично всі згадані у вступі фундаментальні властивості нашого Всесвіту.

Окрім питань про еволюцію Всесвіту як цілого та початкові умови у ньому, ставилось питання про конкретні механізми формування спостережуваної структури Всесвіту. Вперше для Всесвіту, який розширюється, ця задача була поставлена і розв'язана в 1946р. в рамках загальної теорії відносності Ліфшицем [26]. З неї випливало, що спостережувана структура Всесвіту (галактики, їхні скупчення і надскупчення, порожнини) утворилась в результаті еволюції збурень густини, амплітуда яких зростала внаслідок гравітаційної нестійкості. Самі збурення були згенеровані в саму ранню епоху еволюції Всесвіту і, отже, є відбитком тих фізичних процесів, які відбувались тоді. Експериментальне підтвердження такого сценарію вперше було отримане в 1992р. в космічному експерименті COBE (COsmic Background Explorer), метою якого були пошуки слідів таких флюктуацій у просторовому розподілі квантів реліктового випромінювання [27]. Їх існування та зв'язок із збуреннями густини було передбачене в роботі Сакса і Вольфа 1967 року [28]. Виявлені флюктуації температури реліктового випромінювання на рівні  $\sim 0.001\%$  в областях неба розміром  $\sim 10^\circ$  чудово узгоджувались із отриманим Ліфшицем в 1946р. законом наростання їх амплітуди під дією самогравітації у Всесвіті, що розширюється. Важливим виявилось і інше: середньоквадратичні флюктуації температури випромінювання майже не залежали від масштабу в діапазоні кутових розмірів областей на небі від  $10^\circ$  до  $180^\circ$ . Така властивість передбачалась інфляційними моделями Всесвіту - швидке експоненціальне збільшення масштабів на ранній стадії ( $a \sim e^{t/t_1}$ , де  $t_1$  початок інфляції), існування горизонту подій на цій стадії приводили до того, що амплітуда збурень різного масштабу "застигала", коли вони перетинали цей горизонт. Чим менший масштаб збурень густини, тим довше наростала його амплітуда. Тому масштаб збурення визначив його амплітуду ( $\delta(r) \equiv (\rho(r) - \rho)/\rho$ ). Розраховуючи середньоквадратичні флюктуації температури реліктового випромінювання ( $\langle \Delta T/T \rangle$ ,  $T = 2.726K$ ) згідно ефекту

Сакса-Вольфа для кутових масштабів  $\geq 10^\circ$  отримаємо приблизно однакову величину. Експеримент COBE це блискуче підтвердив - вона виявилась рівною  $\sim 10^{-5}$ . Ця величина ще досі є своєрідним репером в дослідженнях великомасштабної структури Всесвіту. Понад два десятки експериментів - наземних і стратосферних - підтвердили цей результат.

І це ще не останнє теоретичне передбачення в космології, яке знайшло експериментальне підтвердження. Якщо структура - це результат розвитку адіабатичних флюктуацій густини, то на кутових масштабах, які відповідають масштабу горизонту на момент відриву реліктового випромінювання від речовини, і менших в  $\sim 2$  і  $\sim 4$  рази повинні спостерігатись "гарячі" і "холодні" плями - так звані акустичні піки. Майже одночасно вони були надійно виявлені в стратосферних експериментах BOOMERANG і MAXIMA [30, 29] на площадках неба розміром 44 кв.гр. і 240 кв.гр. відповідно. Остаточо це явище підтверджене у космічному експерименті WMAP [31], в якому була отримана карта флюктуацій температури реліктового випромінювання всього неба з роздільною здатністю  $\sim 10$  дугових мінут (!).

Становлення космології як науки - це ланцюг сміливих гіпотез, тривалих пошуків шляхів їх перевірки і тріумфів підтверджених передбачень. Її успіхи вражають і переконують нас ще раз у пізнаваності світу, в якому ми живемо. Ось таким виглядає шлях становлення космології у хронології народження найважливіших ідей і експериментальних відкриттів:

**1692** - Ісаак Ньютон в своїх листах до Річарда Бентлі робить спробу побудувати модель однорідного ізотропного статичного світу;

**1916** - А. Айнштайном опубліковано "Основи загальної теорії відносності", рівняння якої дали можливість поставити задачу про динаміку Всесвіту як цілого в рамках фізичної теорії;

**1917** - А. Айнштайн проаналізував рівняння гравітації однорідного ізотропного простору на предмет існування стаціонарних розв'язків; їх відсутність спонукала його ввести у рівняння космологічну сталу (статична модель Айнштайна); В. де Сіттер показав, що модель Айнштайна є нестійкою - малі випадкові початкові відхилення густини речовини від відповідного до космологічної сталої і кривини простору значення приводять до катастрофічної (по експоненціальному закону) зміни масштабів; В. де Сіттер проаналізував моделі з космологічною сталою і нехтівно малою густиною матерії (космологічна модель де Сіттера) і показав, що масштаби зростають в ній по експоненціальному закону;

**1922** - О. Фрідман довів, що рівняння Айнштайна для однорідного ізотропного Всесвіту нестационарні в загальному випадку; отримав розв'язки рівнянь Айнштайна без космологічної сталої, які описують вічне розширення чи розширення з наступним стисканням у залежності від середньої густини матерії у ньому (космологічні моделі Фрідмана);

**1926** - Е. Габбл визначивши відстань до Туманності Андромеди з допомогою цефеїд встановив, що відстань до неї значно перевищує розміри нашої зоряної системи і, отже, є за її межами; зародження позагалактичної астрономії;

**1927** - Г. Леметр незалежно повторив роботу О. Фрідмана, вказавши на лінійність співвідношення швидкість-відстань для позагалактичних об'єктів;

**1929** - Е. Габбл відкрив явище розбігання галактик з швидкістю пропорційною відстані до них, що *теоретично передбачено О. Фрідманом у 1922р. і Г. Леметром у 1927р.*

**1932** - А. Айнштайн і В. де Сіттер проаналізували динаміку розширення Всесвіту з 3-геометрією Евкліда (космологічна модель Айнштайна - де Сіттера), яка є найпростішою із фрідманівських моделей;

**1933** - Ф. Цвіккі вперше вказав на існування несутінної чи темної матерії, яка забезпечує гравітаційну зв'язність багатих скупчень галактик;

**1934** - Р. Толмен показав, що теплове випромінювання у Всесвіті, що розширюється, зберігає свій тепловий характер, але температура падає обернено пропорційно до масштабу;

**1941** - А. МакКеллар на основі аналізу інтенсивностей дублету ліній CN, встановив, що вони збуджуються тепловим випромінюванням з температурою  $\sim 2.3\text{К}$ . Походження його залишалось непоясненим 24 роки.

**1948** - Дж. Гамов запропонував модель гарячого Всесвіту, спостережуваним наслідком якої повинно було б бути ізотропне мікрохвильове фонове випромінювання з планківським розподілом за енергією квантів;

**1963** - Шмідт відкрив квазари - найяскравіші об'єкти, які спостерігаються аж до краю доступної для спостережень області Всесвіту;

**1965** - А. Пензіас і Р. Вільсон експериментально відкрили реліктове випромінювання, *теоретично передбачене Дж. Гамовим в 1948р.*;

**1967** - Р. Саксом і А. Вольфом передбачено існування флюктуацій температури реліктового випромінювання, обумовлених початковими збуреннями метрики простору-часу, густини та швидкості речовини;

**1970** - В. Рубін на основі досліджень кривих обертання спіральних галактик в лінії нейтрального водню 21см довела, що в галактиках знаходиться багато темної матерії, яка заповнює міжзоряний простір і простягається значно далше світної матерії в площині диску і над ним, утворюючи протяжне гало;

**1979** - О. Старобінським, А. Гусом (1981), А. Лінде (1982) започатковано інфляційні моделі Всесвіту - короткочасна фаза роздування (експоненціального розширення) на самих ранніх етапах його еволюції;

**1980** - Дорошкевичем А.Г., Зельдовичем Я.Б., Сюняєвим Р.А. запропонована модель темної матерії у формі масивних беззіткнювальних частинок із залишковими тепловими швидкостями, набутими в результаті розігріву в ранньому Всесвіті; за пропозицією Дж. Р. Бонда і А.С. Салаї її називають гарячою темною матерією (ГТМ), оскільки на момент припинення її взаємодії із баріонною речовиною частинки були ультрарелятивістськими;

**1982** - П.Дж.Е. Піблсом запропонована модель темної матерії у формі масивних беззіткнювальних частинок з нехтуючи малими тепловими швидкостям - холодна темна матерія (ХТМ);

**1990** - в космічному експерименті COBE (FIRAS) доведено практично ідеальну відповідність енергетичного розподілу квантів реліктового випромінювання тепловому з температурою  $T_0 = 2.725 \pm 0.001\text{К}$ ;

**1992** - в космічному експерименті COBE (DMR) зафіксовано флюктуації температури реліктового випромінювання на рівні  $1.1 \times 10^{-5}$  (*передбачених Саксом і Вольфом в 1967р.*) та встановлено, що їх кутовий спектр потужності близький до масштабного-інваріантного, що *передбачається інфляційними моделями*;

**1998** - двома групами вчених (Supernova Cosmology Project і High-z Supernova Search Team) виявлено прискорене розширення нашого Всесвіту, яке вказує на те, що в густині енергії Всесвіту вже кілька мільярдів років домінує щось подібне на космологічну сталу, *уведену А. Айнштайном в 1917р.* (в 1932р. він відмовився від неї, визнавши цей крок помилковим);



**2000** - в двох стратосферних експериментах BOOMERANG і MAXIMA отримано карти температурних флюктуацій двох ділянок неба площею 44 і 240 кв. град. відповідно з роздільною здатністю  $\sim 30'$ . Це дало змогу виявити акустичні піки в спектрі флюктуацій температури реліктового випромінювання, які *передбачаються інфляційними моделями та адіабатичним сценарієм формування структури*;

**2003** - в космічному експерименті WMAP отримано карту флюктуацій температури реліктового випромінювання всього неба з роздільною здатністю  $\sim 10'$ . Остаточно підтверджено інфляційну модель і адіабатичний сценарій формування великомасштабної структури Всесвіту. На основі цих даних визначені параметри космологічної моделі Всесвіту з беспрецедентною для космологічних досліджень точністю. Ними розпочата епоха точнісної космології (за висловом провідних фахівців).

## 4 Сучасний стан і невирішені проблеми

Сучасні фізичні моделі походження та еволюції спостережуваного Всесвіту та його структури можна укласти в часову шкалу від  $-\infty$  до  $+\infty$  таким чином:

**Вічне минуле** ( $-\infty-0$ ) – Те, з чого сформувалось ВСЕ у нашому Всесвіті перебувало у метастабільному стані скалярного поля (або кількох різних полів) з планківською густиною енергії. Простір і час - квантові. Цю епоху називають - *просторово-часова піна*. Випадкові квантові флюктуації приводять до неперервної зміни значень фундаментальних сталих фізичних взаємодій, просторово-часових вимірів. Матерії у формі звичних частинок ще не існує.

**Великий вибух** ( $0-10^{-45}\text{с}$ ) – В одній квантовій області просторово-часової піни в результаті квантових флюктуацій сформувався  $3+1$  простір-час з параметрами фундаментальних взаємодій, які після розпаду первинного стану і ряду фазових переходів привели до 4-х фізичних взаємодій нашого Всесвіту та набору елементарних частинок, які його заповнили. Така локальна область почала спонтанно розширюватись, охолоджуватись, а поле скочуватись у стан з мінімальним значенням енергії (вакуумний стан). *Початок інфляції*.

**Інфляція** ( $10^{-45}-10^{-10}\text{с}$ ) – Короткочасна стадія дуже швидкого (експоненціального) збільшення масштабів - ( $a(t) \sim e^{Ht}$ ). За коротку мить, наприклад, з  $10^{-35}\text{с}$  до  $10^{-25}\text{с}$  масштаби зросли в  $\sim e^{10000000000}$  разів. Це означає, що флюктуації метрики простору-часу квантових масштабів розтягувались, до таких, що наступне розширення продовж кількох мільярдів років збільшило їх до розмірів сучасних галактик, скупчень, надскупчень, порожнин в їх розподілі і т.д. Інфляція закінчується синтезом частинок і квантів полів, які відповідають температурі на момент кінця інфляції ( $t_2$ )  $T \approx 6.4 \times 10^{14} (\frac{10^{-10}\text{с}}{t_2})^{1/2}\text{К}$ . В цю епоху могли згенеруватися реліктові гравітаційні хвилі, які далі вільно поширюються в просторі (перший реліктовий фон, який може бути зареєстрований).

**Баріосинтез** ( $\sim 10^{-12}-10^{-8}\text{с}$ ) – "Суп" із кварків і глюонів "остигає", залишивши в осаді важкі частинки - адрони і їх античастинки.

**Адронна ера** ( $\sim 10^{-8}-10^{-6}\text{с}$ ) – Короткоживучі адрони розпадаються на легші аж до протонів, нейтронів і їх античастинок. Частинки і античастинки перебувають в термодинамічній рівновазі з квантами електромагнітного випромінювання ГеВ-них енергій. Епоха закінчується анігіляцією речовини і антиречовини. Залишився надлишок протонів, нейтронів і електронів над їх античастинками

(його походження поки-що невідоме) і велике число квантів високих енергій, які розпадались на пару віртуальних лептонів.

**Лептонна ера** ( $\sim 10^{-6}$ – $1$ с) – Лептони (електрони, мюони, тау-частинки і відповідні їм нейтрино) перебувають у термодинамічній рівновазі з випромінюванням (народження-анігіляція електрон-позитронних пар). Закінчується анігіляцією пар частинка-античастинка, залишається надлишок електронів над позитронами, кванти електромагнітного випромінювання та нейтрино, які через слабку взаємодію з рештою частинок почали вільно поширюватись у просторі (другий реліктовий фон, який може бути зареєстрований).

**Епоха нуклеосинтезу** (1с–100 с) – Протони і нейтрони стикаючись "злипаються", утворюючи ядра легких елементів: дейтерій, тритій, гелій-3, гелій-4, літій, берилій та ін. Основний з них - гелій, якого на кінець епохи утворилось  $\sim 10\%$  від числа протонів. Отже, спостережуване повсюдно в космосі співвідношення  $He/H \sim 0.1$  є третім реліктом ранніх епох, який надійно реєструється. На кінець епохи сформувався первинний хемічний вміст елементів: ядра легких елементів, вільні електрони, та фотони.

**Епоха домінування випромінювання** (100с–12000р.) – Енергія квантів реліктового випромінювання значно більша потенціалу іонізації атомів водню і гелію. Баріонна речовина повністю іонізована, середовище непрозоре через комтонівське і томпсонівське розсіювання квантів на електронах. Число квантів в одиниці об'єму в  $\sim 10^8$  разів більше числа протонів, тому густина енергії випромінювання значно більша густини речовини і воно визначає динаміку розширення Всесвіту. Масштабний фактор  $a(t) \sim t^{1/2}$ . Але оскільки його температура падає обернено пропорційно масштабному фактору, то густина енергії падає з часом обернено пропорційно четвертій степені масштабного фактора. Густина ж енергії матерії (баріонна + темна) падає обернено пропорційно кубу масштабного фактора. А тому настає момент, коли густина енергії випромінювання стає меншою густини енергії речовини, яка починає домінувати і визначати темп розширення. Це настає в момент 12000 років після Великого вибуху, який відповідає червоному зміщенню  $z_{eq} \approx 6000$ .

**Перехідна епоха** (12000р.–377000р.) – Баріонна речовина ще повністю іонізована і через томпсонівське розсіювання тісно пов'язана з випромінюванням. Тиск такої баріонної плазми дуже високий. Густина речовини починає домінувати і визначати темп розширення. Закінчується, коли енергії квантів вже недостатньо, щоб іонізувати водень.

**Космологічна рекомбінація** (377000р.–400000р.) – Короткочасна епоха ( $z_{rec} \approx 1000$ ), впродовж якої степінь іонізації водню ( $x = n_p/(n_p + n_H)$ ) падає від 1 до 0. Середовище стає прозорим, випромінювання відривається від речовини і вільно поширюється в просторі. Воно приходить до нас з поверхні сферичної оболонки скінченної товщини на відстані  $\sim 13$  мільярдів років — сфери останнього розсіяння. Це четвертий релікт, який виявлений А. Пензіасом і Р. Вільсоном в 1965р.

**Темні віки** (400000р.– $10^8$ р.) – Середовище прозоре для випромінювання. Тиск у речовині нехтуючи малий, що дає можливість наростати амплітуді збурень густини речовини під дією самогравітації. Густина енергії матерії значно більша густини енергії випромінювання. Матерія із практично нульовим тиском нейтрального газу з первинним хемічним вмістом визначає темп розширення Всесвіту. Масштабний фактор  $a(t) \sim t^{2/3}$ . Ще не має ні зір, ні галактик, суцільна темнота у в'язу Всесвіту.

**Епоха зір і галактик, розширення сповільнюється** ( $10^8$ р.– $6 \times 10^9$ р.) – Народжуються перші зорі, які у воднево-гелієвому середовищі мають бути дуже масивними  $\sim 10^2$ – $10^3 M_{\odot}$ . Їх час життя малий і закінчують вони його спалахом наднової величезної потужності. Жорстким випромінюванням яскравих зір та ударними хвилями, згенерованих спалахами наднових, міжзоряний і міжгалактичний газ іонізується другий раз. Міжзоряне середовище збагачується важкими елементами, що сприяє утворенню зір менших мас. Починається епоха бурхливого зореутворення і формування галактик. Розширення Всесвіту відбувається із сповільненням - самогравітація речовини переважає.

**Епоха зір і галактик, розширення прискорюється** ( $6 \times 10^9$ р.– $13 \times 10^9$ р., сьогодні) – Дані тесту видима зоряна величина - червоне зміщення для наднових типу Ia, вимірювання спектру потужності флюктуацій температури реліктового випромінювання та просторової концентрації галактик вказують на те, що 7 мільярдів років тому розширення Всесвіту із сповільненням змінилось на розширення з прискоренням. Так почала проявляти себе темна енергія на кшталт космологічної сталі, яка може бути інтерпретована як додатня густина енергії вакууму. Вона, чи щось подібне на неї (квінтесенція), відіграють роль сили, яка "розпирає простір" і спонукає галактики до збільшення темпу розбігання. Ця темна енергія почала переважати густину енергії звичайної матерії, яка самогравітує, приблизно 4 мільярди років тому, коли наша Земля тільки народжувалась.

**Епоха темної енергії** ( $13 \times 10^9$ р., сьогодні – вічне майбутнє) – В нашій та інших галактиках ще довго будуть народжуватися нові зорі, обігрівати сусідні планети, вмирати, даючи життя іншим... Але все це буде відбуватися на тлі прискореного розширення Всесвіту, з часом швидкість віддалення від нас галактик наростатиме. Через приблизно сотню мільярдів років наступить момент, коли остання галактика щезне за горизонтом подій. Разом з нею щезне і позагалактична астрономія. Ті що житимуть в Галактиці тоді, заздритимуть нам - спостерігачам і сучасникам такого різноманіття світу галактик!

З приведеного опису може скластися враження, що космологія уже завершена і все вже вивчено. Насправді ж, описаний сценарій еволюції Всесвіту - дуже загальний. В ньому ще багато білих плям, вивчення яких може радикально змінити наші уявлення про світ, в якому ми живемо. Серед них це - природа частинок темної матерії, природа і властивості темної енергії. Із всієї баріонної речовини, яка світиться або може світитися, астрономи бачать лише 20 відсотків. В яких закапелках Всесвіту ховається решта 80 відсотків? - Це робота ще для багатьох поколінь фізиків і астрономів. Є багато інших, на перший погляд менш важливих нерозв'язаних проблем. Але це тільки на перший погляд. Саме там ведуться "найтяжчі бої науки за істину".

Автор висловлює щире подяку Степану Апуновичу за корисні обговорення, зауваження та допомогу в роботі над статтею.

## Література

- [1] Linde, A. Particle Physics & Inflationary Cosmology / New York: Harwood, 1990
- [2] Peebles, P.J.E. Principles of Physical Cosmology / Princeton U Press, 1993

- [3] Padmanabhan, T. & Narlikar, J. Structure formation in the universe / Cambridge U Press, 1995
- [4] Guth, A. H. The inflationary universe / Addison-Wesley, 1997
- [5] Peacock, J.P. Cosmological physics / Cambridge U Press, 1999
- [6] Rees, M. New perspectives in astrophysical cosmology / Cambridge U Press, 2000
- [7] Raine, D. J. & Thomas, E. G. An introduction to the science of cosmology / Institute of Physics, 2001
- [8] Einstein A. //Ann. Phys.-1916.-v.49.-P.769.
- [9] Einstein A. //Sitz.Preuss.Akad.d.Wiss.Phys.-Math.-1917.-P.142.
- [10] Friedmann A.//Z.Phys.-1922.-v.10.-P.377-340.
- [11] Hubble E. //Proc. Nat. Acad. Sci. (Wash.)-1929.-v.15.-P.168.
- [12] Gamov G. //Nature.-1948.-v.162.-P.680.
- [13] Penzias A.A., Wilson R.W. //Astrophysical Journal.-1965.-v.142.-P.419.
- [14] Zwicky F. //Helv.Phys.Acta.-1933.-v.6.-P.110.
- [15] Fukuda Y. et al. //Phys. Rev. Lett.-1999.-v.82.-P.1810.
- [16] Peebles, P.J.E. //Astrophysical Journal.-1982.-v.262.-P.L1.
- [17] de Sitter W. //Proc. Kon. Ned. Akad. Wet.-1917.-v.19.-p.1217; v.20.-p.229.
- [18] Perlmutter S., et al. //Astrophysical Journal.-1999.-v.517.-P.565-586.
- [19] Riess A., et al. //Astronomical Journal.-1998.-v.116.-P.1009.
- [20] Sahni V., Starobinsky A. //International Journal of Modern Physics D.-2000.-v.9,N4.-P.373.
- [21] Carroll S.M. // Living Rev.Rel.-2001.-v.4.-P.1.
- [22] Старобинский А.А. //Письма в ЖЭТФ.-1979.-т.30.-с.719
- [23] Starobinsky A.A. //Phys. Lett. Ser. B.-1980.-v.91.-с.99.
- [24] Guth A. H. //Phys. Rev.-1981.-v. D23.-p.347.
- [25] Linde A. //Phys. Lett.-1982.-v.108B.-p.389.
- [26] Лифшиц Е.М. //Журнал exper. и теор. физики.-1946.-т.16,н7.-С.585.
- [27] Smoot G.F. et al.//Astrophysical Journal Letters.-1992.-v.396.-P.1.
- [28] Sachs R.K., Wolfe A.M. //Astrophysical Journal.-1967.-v.147.-P.73.
- [29] Mauskopf P., et al. //Astrophysical Journal Letters.-2000.-v.536.-P.59.
- [30] Hanany S., et al. //Astrophysical Journal Letters.-2000.-v.545.-P.5.
- [31] Hinshaw G. et al. //Astrophysical Journal Suppl. Ser.-2003.-v.148.-P.135.