

**КОСМОЛОГІЯ** – розділ астрономії і астрофізики, вивчаючий походження, великомасштабну структуру і еволюцію Всесвіту. Дані для космології в основному одержують з астрономічних спостережень. Для їх інтерпретації в даний час використовується загальна теорія відносності А.Ейнштейна (1915). Створення цієї теорії і проведення відповідних спостережень дозволило на початку 1920-х років поставити космологію в ряд точних наук, тоді як до цього вона швидше областю філософії. Зараз склалися дві космологічні школи: емпірики обмежуються інтерпретацією наглядових даних, не екстраполюючи свої моделі в невивчені області; теоретики намагаються пояснити спостережуваний Всесвіт, використовуючи деякі гіпотези, відібрані за принципом простоти і елегантності. Широкою популярністю користується зараз космологічна модель Великого вибуху, згідно якої розширення Всесвіту почалося якийсь час тому назад з дуже щільного і гарячого стану; обговорюється і стаціонарна модель Всесвіту, в якому він існує вічно і не має ні початку, ні кінця.

### **КОСМОЛОГІЧНІ ДАНІ**

Під космологічними даними розуміють результати експериментів і спостережень, що мають відношення до Всесвіту в цілому в широкому діапазоні простору і часу. Будь-яка мислима космологічна модель повинна задовольняти цим даним. Можна виділити 6 основних наглядових фактів, які повинна пояснити космологія:

1. У великих масштабах Всесвіт однорідний і ізотропний, тобто галактики і їх скупчення розподілені в просторі рівномірно (однорідно), а їх рух хаотично і не має явно виділеного напрямку (ізотропно). Принцип Коперніка, що «зсунув Землю з центру миру», був узагальнений астрономами на Сонячну систему і нашу Галактику, які також виявилися цілком рядовими. Тому, виключаючи дрібні неоднорідності в розподілі галактик і їх скупчень, астрономи рахують Всесвіт такої ж однорідної скрізь, як і поблизу нас.

2. Всесвіт розширяється. Галактики віддаляються один від одного. Це відкрив американський астроном Е.Хаббл в 1929. Закон Хаббла свідчить: чим далі галактика, тим швидше вона віддаляється від нас. Але це не означає, що ми знаходимося в центрі Всесвіту: в будь-якій іншій галактиці спостерігачі бачать те ж саме. За допомогою нових телескопів астрономи поглибилися у Всесвіт значно далі, ніж Хаббл, але його закон залишився вірний.

3. Простір навколо Землі заповнений фоновим мікрохвильовим радіовипромінюванням. Відкрите в 1965, воно стало, разом з галактиками, головним об'єктом космології. Його важливою властивістю є висока ізотропність (незалежність від напрямку), вказуюча на його зв'язок з далекими областями Всесвіту і підтверджуюча їх високу однорідність. Якби це було випромінювання нашої Галактики, то воно відображало б її структуру. Але експерименти на балонах і супутниках довели, що це випромінювання надзвичайно однорідно і має спектр випромінювання абсолютно чорного тіла з температурою близько 3 К. Очевидно, це реліктове випромінювання молодого і гарячого Всесвіту, що сильно остигнуло в результаті його розширення.

4. Вік Землі, метеоритів і найстаріших зірок небагато чим менше віку Всесвіту, обчисленого по швидкості її розширення. Відповідно до закону Хаббла Всесвіт усюди розширяється з однаковою швидкістю, яку називають *постійною Хаббла*  $H$ . По їй можна оцінити вік Всесвіту як  $1/H$ . Сучасні вимірювання  $H$  приводять до віку Всесвіту біля 20 млрд. років. Дослідження продуктів радіоактивного розпаду в метеоритах дають вік біля 10 млрд. років, а найстаріші зірки мають вік біля 15 млрд. років. До 1950 відстані до галактик недооцінювалися, що приводило до завищеного значення  $H$  і малого віку Всесвіту, меншого віку Землі. Щоб дозволити цю суперечність, Г.Бонді, Т.Голд і Ф.Хойл в 1948 запропонували стаціонарну космологічну модель, в якій вік Всесвіту нескінченний, а у міру її розширення народжується нова речовина.

5. У всьому спостережуваному Всесвіті, від близьких зірок до найдальших галактик, на кожні 10 атомів водню доводиться 1 атом гелію. Здається неймовірним,

щоб усюди місцеві умови були такі однакові. Сильна сторона моделі Великого вибуху якраз в тому, що вона передбачає скрізь однакове співвідношення між гелієм і воднем.

6. В областях Всесвіту, віддалених від нас в просторі і в часі, більше активних галактик і квазарів, ніж поряд з нами. Це указує на еволюцію Всесвіту і суперечить теорії стаціонарного Всесвіту.

### КОСМОЛОГІЧНІ МОДЕЛІ

Будь-яка космологічна модель Всесвіту спирається на певну теорію гравітації. Таких теорій багато, але лише деякі з них задовольняють спостережуваним явищам. Теорія тяжіння Ньютона не задовольняє їм навіть в межах Сонячної системи. Краще за всі узгоджується із спостереженнями загальна теорія відносності Ейнштейна, на основі якої російський метеоролог А.Фрідман в 1922 і бельгійський абат і математик Ж.Леметр в 1927 математично описали розширення Всесвіту. З космологічного принципу, що постулював просторову однорідність і ізотропність світу, вони отримали модель Великого вибуху. Їх висновок підтвердився, коли Хаббл знайшов зв'язок між відстанню і швидкістю розгону галактик. Другий важливий прогноз цієї моделі, зроблений Г.Гамовим, торкався реліктового випромінювання, спостережуваного зараз як залишок епохи Великого вибуху. Інші космологічні моделі не можуть так само природно пояснити це ізотропне фонове випромінювання.

**Гарячий Великий вибух.** Згідно космологічної моделі Фрідмана – Леметра, Всесвіт виник у момент Великого вибуху – біля 20 млрд. років тому, і його розширення продовжується дотепер, поступово припиняючись. В першу мить вибуху матерія Всесвіту мала нескінченні густину і температуру; такий стан називають сингулярністю.

Згідно загальної теорії відносності, гравітація не є реальною силою, а є викривлення простору-часу: чим більше густина матерії, тим сильніше викривлення. У момент початкової сингулярності викривлення теж було нескінченним. Можна виразити нескінченну кривизну простору-часу іншими словами, сказавши, що в початковий момент матерія і простір одночасно вибухнули скрізь у Всесвіті. У міру збільшення об'єму простору Всесвіту, що розширяється, густина матерії в ньому падає. С.Хокинг і Р.Пенроуз довели, що у минулому був неодмінний сингулярний стан, якщо загальна теорія відносності застосовна для опису фізичних процесів в дуже ранньому Всесвіті.

Щоб уникнути катастрофічної сингулярності у минулому, вимагається істотно змінити фізику, наприклад, припустивши можливість мимовільного безперервного народження матерії, як в теорії стаціонарного Всесвіту. Але астрономічні спостереження не дають для цього ніяких підстав.

Чим більш ранні події ми розглядаємо, тим був меншим їх просторовий масштаб; у міру наближення до початку розширення горизонт спостерігача стискається. В найперші миті масштаб такий малий, що ми вже не в праві застосовувати загальну теорію відносності: для опису явищ в таких малих масштабах потрібна квантова механіка. Але квантової теорії гравітації поки не існує, тому ніхто не знає, як розвивалися події до моменту  $10^{-43}$  с, званого *планківским часом* (на честь батька квантової теорії). В той момент густина матерії досягала неймовірного значення  $10^{90}$  кг/см<sup>3</sup>, яке не можна порівняти не тільки з густиною оточуючих нас тіл (менше 10 г/см<sup>3</sup>), але навіть з густиною атомного ядра (біля  $10^{12}$  кг/см<sup>3</sup>) – найбільшою густиною, доступною в лабораторії. Тому для сучасної фізики початком розширення Всесвіту служить планківський час.

Ось за таких умов немислимо високої температури і густини відбулося народження Всесвіту. Причому це могло бути народженням у прямому розумінні: деякі космологи (скажімо, Я.Б.Зельдовіч в СРСР і Л.Паркер в США) вважали, що частинки і гамма-фотони були народжені в ту епоху гравітаційним полем. З погляду фізики, цей процес міг відбутися, якщо сингулярність була анізотропною, тобто гравітаційне поле було неоднорідним. В цьому випадку приливні гравітаційні сили могли «втягнути» з вакууму реальні частинки, створивши таким чином речовину Всесвіту.

Вивчаючи процеси, що відбувалися відразу після Великого вибуху, ми розуміємо, що наші фізичні теорії ще вельми невивчені. Теплова еволюція раннього Всесвіту залежить від народження масивних елементарних частинок – адронів, про які ядерна фізика знає ще мало. Багато хто з цих частинок нестабільний і короткоживучий. Швейцарський фізик Р.Хагедорн вважає, що може існувати велика кількість адронів зростаючих мас, які удосталь могли формуватися при температурі порядку  $10^{12}$  К, коли гігантська густина випромінювання приводила до народження адронних пар, що складаються з частинки і античастки. Цей процес повинен був би обмежити зростання температури у минулому.

Згідно іншій точці зору, кількість типів масивних елементарних частинок обмежена, тому температура і густина в період адронної ери повинна була досягати нескінченних значень. У принципі це можна було б перевірити: якби складові адронів – кварки – були стабільними частинками, та деяка кількість кварків і антикварків повинна була зберегтися від тієї гарячої епохи. Але пошук кварків виявився марним; швидше за все, вони нестабільні.

Після першої мілісекунди розширення Всесвіту сильна (ядерна) взаємодія перестала грати в ній визначальну роль: температура знизилася настільки, що атомні ядра перестали руйнуватися. Подальші фізичні процеси визначалися слабкою взаємодією, відповідальною за народження легких частинок – лептонів (тобто електронів, позитронів, мезонів і нейтрино) під дією теплового випромінювання. Коли в ході розширення температура випромінювання знизилася приблизно до  $10^{10}$  К, лептонні пари перестали народжуватися майже всі позитрони і електрони анігілювали; залишилися лише нейтрино і антинейтрино, фотони і небагато що збереглися з попередньої епохи протонів і нейтронів. Так завершилася лептонна ера.

Наступна фаза розширення – фотонна ера – характеризується абсолютним переважанням теплового випромінювання. На кожний протон або електрон, що зберігся, доводиться по мільярду фотонів. Спочатку це були гамма-кванти, але у міру розширення Всесвіту вони втрачали енергію і ставали рентгенівськими, ультрафіолетовими, оптичними, інфрачервоними і, нарешті, зараз стали радіоквантами, які ми приймаємо як фонове (реліктове) радіовипромінювання.

**Невирішені проблеми космології Великого вибуху.** Можна відзначити 4 проблеми, що стоять зараз перед космологічною моделлю Великого вибуху.

1. Проблема сингулярності: багато хто сумнівається в застосовності загальної теорії відносності, даючої сингулярність у минулому. Пропонуються альтернативні космологічні теорії, вільні від сингулярності.

2. Тісно пов'язана з сингулярністю проблема ізотропної Вселеної. Здається дивним, розширення, що почалося з сингулярного стану, виявилось таким ізотропним. Не виключено, правда, що анізотропне спочатку розширення поступово стало ізотропним під дією певних сил.

3. Однорідна на найбільших масштабах, на менших масштабах Всесвіт вельми неоднорідний (галактики, скупчення галактик). Важко зрозуміти, як одна лише гравітація могла привести до появи такої структури. Тому космологи вивчають можливості неоднорідних моделей Великого вибуху.

4. Нарешті, можна запитати, яке майбутнє Всесвіту? Для відповіді необхідно знати середню густину матерії у Всесвіті. Якщо вона перевершує деяке критичне значення, то геометрія простору-часу замкнута, і в майбутньому Всесвіт неодмінно стиснеться. Замкнутий Всесвіт не має меж, але його об'єм скінчений. Якщо густина нижче критичної, то Всесвіт відкритий і розширятиметься вічно. Відкритий Всесвіт нескінченний і має тільки одну сингулярність спочатку. Поки спостереження краще узгоджуються з моделлю відкритого Всесвіту.

Походження великомасштабної структури.

У космологів на цю проблему є дві протилежні точки зору.

Найрадикальніша полягає в тому, що спочатку був хаос. Розширення раннього Всесвіту відбувалося у край анізотропно і неоднорідно, але потім процеси згладили анізотропію і наблизили розширення до моделі Фрідмана – Леметра. Доля неоднорідностей вельми цікава: якщо їх амплітуда була великою, то неминуче вони повинні були колапсувати в чорні діри з масою, визначуваною поточним горизонтом. Їх формування могло початися прямо з планківського часу, так що у Всесвіті могла бути безліч дрібних чорних дір з масами до  $10^{-5}$  г. Проте С.Хокинг показав, що «міні-діри» повинні, випромінюючи, втрачати свою масу, і до нашої епохи могли зберегтися тільки чорні діри з масами більше  $10^{16}$  г, що відповідає масі невеликої гори.

Первинний хаос міг містити обурення будь-якого масштабу і амплітуди; найкрупніші з них у вигляді звукових хвиль могли зберегтися від епохи раннього Всесвіту до ери випромінювання, коли речовина була ще достатньо гарячою, щоб випускати, поглинати і розсіювати випромінювання. Але із закінченням цієї ери плазма, що остигнула, рекомбінувала і перестала взаємодіяти з випромінюванням. Тиск і швидкість звуку в газі впали, унаслідок чого звукові хвилі перетворилися на ударні хвилі, що стискають газ і примушуючи його колапсувати в галактики і їх скупчення. Залежно від типу початкових хвиль розрахунки передбачають вельми різну картину, далеко не завжди відповідну спостережуваній. Для вибору між можливими варіантами космологічних моделей важливою є одна філософська ідея, відома як антропний принцип: із самого початку Всесвіт повиний був мати такі властивості, які дозволили сформуватися в ньому галактикам, зіркам, планетам і розумному життю на них. Інакше комусь було б займатися космологією.

Альтернативна точка зору полягає в тому, що про початкову структуру Всесвіту можна взнати не більш того, що дають спостереження. Згідно цьому консервативному підходу, не можна рахувати юний Всесвіт хаотичним, оскільки зараз він вельми ізотропний і однорідний. Ті відхилення від однорідності, які ми спостерігаємо у вигляді галактик, могли вирости під дією гравітації з невеликих початкових неоднорідностей густини. Проте дослідження великомасштабного розподілу галактик (в основному проведені Дж.Піблсом в Принстоні), здається, не підтверджують цю ідею. Інша цікава можливість полягає в тому, що скупчення чорних дір, що народилися в адронну еру, могли стати початковими флуктуаціями для формування галактик.

**Відкритий або замкнутий Всесвіт?** Найближчі галактики віддаляються від нас з швидкістю, пропорційною відстані; але більш далекі не підкоряються цій залежності: їх рух указує, що розширення Всесвіту з часом сповільнюється. В замкнутій моделі Всесвіту під дією тяжіння розширення в певний момент зупиняється і змінюється стисненням, але спостереження показують, що уповільнення галактик відбувається все ж таки не так швидко, щоб коли-небудь відбулася повна зупинка.

Щоб Всесвіт був замкнутий, середня густина матерії в ній повинна перевищувати певне критичне значення. Оцінка густини видимої і невидимої речовини вельми близька до цього значення.

Розподіл галактик в просторі вельми неоднорідний. Наша Місцева група галактик, що включає Чумацький Шлях, Туманність Андромеди і декілька галактик трохи менших, лежить на периферії величезної системи галактик, відомої як надскупчення в Діві (Virgo), центр якого співпадає з скупченням галактик Virgo. Якщо середня густина миру велика і Всесвіт замкнутий, то повинне було б спостерігатися сильне відхилення від ізотропного розширення, викликане тяжінням нашої і сусідніх галактик до центру надскупчення. У відкритому Всесвіті це відхилення невелике. Спостереження швидше узгоджуються з відкритою моделлю.

Великий інтерес космологів викликає вміст в космічній речовині важкого ізотопу водню – дейтерію, який утворився в ході ядерних реакцій в перші миті після Великого вибуху. Зміст дейтерію виявився надзвичайно чутливим до густини речовини в ту епоху, а отже, і в нашу. Проте «дейтерієвий тест» здійснити нелегко, бо потрібно

досліджувати первинну речовину, що не побувала з моменту космологічного синтезу в надрах зірок, де дейтерій легко згоряє. Вивчення гранично далеких галактик показало, що зміст дейтерію відповідає низькій густині матерії і, отже, відкритій моделі Всесвіту.

### **Альтернативні космологічні моделі.**

Взагалі кажучи, в самому початку свого існування Всесвіт міг бути вельми хаотичний і неоднорідний; сліди цього ми, можливо, спостерігаємо сьогодні у великомасштабному розподілі речовини. Проте період хаосу не міг тривати довго. Висока однорідність космічного фонового випромінювання свідчить, що Всесвіт був дуже однорідний у віці 1 млн. років. А розрахунки космологічного ядерного синтезу указують, що якби після закінчення 1 с після початку розширення існували великі відхилення від стандартної моделі, то склад Всесвіту був би зовсім іншим, ніж насправді. Проте про те, що було протягом першої секунди, ще можна сперечатися. Окрім стандартної моделі Великого вибуху, у принципі існують і альтернативні космологічні моделі:

1. Модель, симетрична щодо матерії і антиматерії, припускає рівну присутність цих двох видів речовини у Всесвіті. Хоча очевидно, що наша Галактика практично не містить антиречовини, сусідні зоряні системи цілком могли б цілком складатися з неї; при цьому їх випромінювання б було точне таким же, як у нормальних галактик. Проте в більш ранні епохи розширення, коли речовина і антиречовина були в більш тісному контакті, їх анігіляція повинна була народжувати могутнє гамма-випромінювання. Спостереження його не знаходять, що робить симетричну модель маловірогідною.

2. В моделі Холодного Великого вибуху передбачається, що розширення почалося при температурі абсолютного нуля. Правда, і в цьому випадку ядерний синтез повинен відбуватися і розігрівати речовину, але мікрохвильове фонове випромінювання вже не можна прямо пов'язувати з Великим вибухом, а потрібно пояснювати якимось інакше. Ця теорія приваблива тим, що речовина в ній схильна фрагментації, а це необхідне для пояснення великомасштабної неоднорідності Всесвіту.

3. Стационарна космологічна модель припускає безперервне народження речовини. Основне положення цієї теорії, відоме як Ідеальний космологічний принцип, затверджує, що Всесвіт завжди був і залишиться таким, як зараз. Спостереження спростовують це.

4. Розглядаються змінені варіанти ейнштейнівської теорії гравітації. Наприклад, теорія К.Бранса і Р.Дікке з Принстона загалом узгоджується із спостереженнями в межах Сонячної системи. Модель Бранса – Дікке, а також більш радикальна модель Ф.Хойла, в якій деякі фундаментальні постійні змінюються з часом, мають майже такі ж космологічні параметри в нашу епоху, як і модель Великого вибуху.

5. На основі модифікованої ейнштейнівської теорії Ж.Леметр в 1925 побудував космологічну модель, об'єднуючу Великий вибух з тривалою фазою спокійного стану, протягом якої могли формуватися галактики. Ейнштейн зацікавився цією можливістю, щоб обґрунтувати свою улюблену космологічну модель статичного Всесвіту, але коли було відкрито розширення Всесвіту, він публічно відмовився від неї.

### **! ЗАПАМ'ЯТАЙТЕ**

1. Космологія – розділ астрономії і астрофізики, вивчаючий походження, великомасштабну структуру і еволюцію Всесвіту.

2. Всесвіт розширяється. Галактики віддаляються один від одного.

3. Згідно космологічної моделі Фрідмана – Леметра, Всесвіт виник у момент Великого вибуху – біля 20 млрд. років тому, і його розширення продовжується дотепер, поступово припиняючись.

4. Космологічні моделі: Великого вибуху, стационарна космологічна модель, модель Холодного Великого вибуху, космологічна модель, об'єднуюча Великий вибух з

тривалою фазою спокійного стану, протягом якої могли формуватися галактики, модель пульсуючого Всесвіту.