

СУЧАСНА КОСМОЛОГІЯ

Частина 1.

Прискорене розширення і "темна енергія" Всесвіту



Михайло Сажин

доктор фіз.-мат. наук,
пров. наук. співр.
Державного астро-
номічного інституту
ім. П.К. Штернберга
Московського
державного
університету
ім. М.В. Ломоносова,
м. Москва



Ольга Сажина

канд. фіз.-мат. наук,
наук. співр.
Державного астро-
номічного інституту
ім. П.К. Штернберга
Московського
державного
університету
ім. М.В. Ломоносова,
м. Москва

Сучасну космологію можна умовно розділити на **математичну** (або *теоретичну*), **фізичну** і **спостережну**. *Теоретична* космологія вивчає різні моделі Всесвіту, у тому числі і досить екзотичні, які не мають відношення до реальної дійсності. *Фізична* космологія досліджує процеси у Всесвіті і будує спостережувані моделі явищ. Нарешті, активно розвивається *спостережна* космологія, яка з успіхом використовує методи сучасної астрономії. До послуг космологів — наземні телескопи різних діапазонів хвиль — від радіо- до оптичного — і космічні апарати, що стали наразі практично всехвильовими — від твердого гамма-випромінювання до довгохвильового радіовипромінювання.

Отже, поле діяльності сучасної космології дуже велике й охопити все в одній невеликій статті неможливо. Та це і не потрібно. У кожен історичний момент часу в кожній науці існує лише один-два найбільш привабливих предметів дослідження, найважливіших для розвитку цієї науки. Так обстоїть справа й у космології.

Так, у 1960 — 1970-х рр. в космології особлива увага приділялася *реліктовому випромінюванню* і взаємодії цього випромінювання з речовиною і гравітаційними полями. У 1980-х рр. увага космологів (а також фізиків-теоретиків) переключилася на створення *теорії інфляції* (теорії раннього Всесвіту) і теорії великомасштабної структури Всесвіту. А в 1990-х рр. таким предметом стало вивчення анізотропії реліктового випромінювання і темної матерії в нашій Галактиці методами гравітаційного лінзування. І, звичайно ж, найважливіше відкриття останньої декади ХХ ст. — прискорене розширення нашого Всесвіту.

З усіх тем сучасної космології ми розглянемо тільки три найважливіші: **реліктове випромінювання** і його **анізотропію**; **прискорене розширення нашого Всесвіту** і причини цього явища ("**темна енергія**")"; вивчення "**темної матерії**" методами **гравітаційного лінзування**. Це ті основні теми, що дозволили зробити космологію точною наукою чи, як говорять, "прецизійною" космологією. Усього 20-30 років тому космологи сперечалися про те, відкритий чи замкнутий наш Всесвіт, постійна Габбла дорівнює 50 км/сек/Мпк чи 150 км/сек/Мпк. Зараз же точність вимірювання глобальних космологічних параметрів Всесвіту складає кілька відсотків. Більш того, після реалізації амбіційних проектів типу *Planck* чи *SNAP* (*SuperNovae Acceleration Probe*) точність вимірів підвищиться, можливо, навіть у 10 разів!

Почнемо наше обговорення з особливостей законів у Всесвіті, що розширюється, потім перейдемо до анізотропії реліктового випромінювання, розглянемо питання про прискорене розширення Всесвіту і новий вид матерії ("**темна енергія**"), що викликає це прискорене розширення, а потім приділимо увагу вже більш традиційному питанню, пов'язаному з вивченням гравітаційних лінз і "**темної матерії**" методами гравітаційного лінзування.

Всесвіт, що розширюється

Всесвіт, що розширюється, простір, що розширюється, — що це таке?

Наприклад, коли розширювалася територія, контрольована імперією Наполеона, ця територія ставала більшою, її границі відсувалися. Розширення простору так уявити собі не можна. Найкраще розширення простору можна представити, як збільшення поверхні тістечка з гродзинками або повітряної кульки, коли її надувають. При цьому площа поверхні кульки — двовимірний простору — збільшується, хоча границь у такої поверхні немає. Якщо намалювати на поверхні кульки кілька галактик (зрозуміло, двовимірних), то при її надуванні відстані між такими галактиками, обмірювані по поверхні кульки, будуть збільшуватися. Цей приклад — досить точна аналогія того, як відбувається розширення нашого тривимірного простору, як міняються відстані між галактиками.

терігача в кожен момент часу існує принципово недоступна для експериментального вивчення область Всесвіту — саме та, котра знаходиться поза кулею з радіусом, що дорівнює радіусу горизонту частинок. Це не означає, що область поза кулею є принципово непізнаваною: пройде час, горизонт частинок "розсунеться" і область поза сучасним горизонтом частинок стане доступною майбутнім спостерігачам.

Отже, горизонт частинок зростає. З іншого боку, Всесвіт прискорено розширюється, "розносячи" спостерігача і джерела випромінювання усе далі і далі один від одного. Швидкість розширення Всесвіту цілком визначається речовиною, що його наповнює. Отже, якщо наш Всесвіт заповнений *особливою матерією*, яка називається "*темною енергією*", то в майбутньому може статися, що збільшення розміру горизонту частинок припиниться, і він стане постійною величиною. Тоді поза об'ємом, охоплюваного горизонтом частинок, залишиться вся інша частина Всесвіту (краще ска-

Прискорене розширення повинно було бути в ранньому Всесвіті в епоху інфляції, — воно стало тією рушійною силою, що "розігнала" речовину Всесвіту. Після епохи інфляції Всесвіт розширювався за степеневим законом, тепер же знову розширюється з прискоренням...

Задовго до обговорення проблем раннього Всесвіту і теорії інфляції А. Айнштайн увів поняття лямбда-члена — нової універсальної сталої поряд з такими сталими, як швидкість світла чи гравітаційна стала. Айнштайну ця стала знадобилася для створення стаціонарної космологічної моделі. Однак під впливом ідей О. Фрідмана про нестаціонарний Всесвіт, що розширюється, він відмовився від штучного введення цієї константи. Але чудово ця константа виявилася затребуваною під час обговорення ідей теорії інфляції і особливостей розширення сучасного Всесвіту...

Для пояснення прискореного розширення Всесвіту необхідна присутність матерії нового типу — речовини, що має властивість $\epsilon \neq \neq i$ і яку космологи назвали "темна енергія"

Фізичні закони для простору нашого Всесвіту, що розширюється, значно відрізняються від фізичних законів для статичного простору-часу. Зокрема змінюються кінематичні властивості поширення фотонів (квантів світла). Для розуміння кінематичних законів поширення фотонів, що будуть обговорюватися нижче, коротко обговоримо кінематичні властивості пробних частинок у Всесвіті, що розширюється.

Перша властивість, яка відрізняє простір, що розширюється, від статичного, полягає в тому, що існує *момент початку розширення*, який можна ототожнити з *моментом народження Всесвіту*. Нагадаємо експериментальний факт, покладений в основу спеціальної і загальної теорії відносності, а саме, що максимальна швидкість поширення сигналів дорівнює швидкості світла. З цього факту негайно випливає, що *в кожен момент часу нам для спостереження доступна тільки та частина Всесвіту, відкля до нас встигли дійти пробні частинки, що рухаються зі швидкістю світла*. Границя цієї частини Всесвіту в космології називається *горизонтом частинок*. Іншими словами, для спос-

зати — *Мультисвіту*), що буде для нас *принципово неспостережуваною чи, іншими словами, принципово непізнаваною*. Поза областю, обмеженою розмірами горизонту частинок, яку можна назвати нашим *доменом Мультисвіту* або нашим Всесвітом, буде існувати багато інших всесвітів, інформацію про стан речовини в яких ми ніколи не одержимо.

Звертаємо увагу читача на те, що слово "*всесвіт*" тут написано з малої літери. Формально це може вважатися порушенням правил граматики, але, по суті, це правильно, оскільки тепер стало ясно, що об'єкт, який ми називали "*Всесвіт*", може існувати в множині. Ця ситуація цілком аналогічна до тієї, коли тільки нашу Галактику — *Молочний Шлях* — ми пишемо з прописної букви, тому що зараз ми знаємо, що галактик, подібних до нашої, у нашому Всесвіті безліч. Спочатку люди знали тільки найближчий космос — простір нашої Сонячної системи, потім горизонти розширилися, і людство усвідомило себе належним цілій Галактиці з мільярдами зір і, можливо, планетних систем. І от настає час, коли "*і цілого світу мало*", коли навіть весь наш Всесвіт не вичерпує всього

простору. Для позначення нового об'єкта, що представляє опис безлічі "всесвітів", ми вводимо новий термін — *Мультивсесвіт*. Кожен його домен обмежений розміром причинної зв'язності — розміром горизонту частинок. Цей досить неприємний висновок, що обмежує горизонти нашого пізнання, космологи зробили при аналізі наслідків явища прискореного розширення нашого Всесвіту. Простору виявилось набагато більше, ніж ми припускали, але, на жаль, не весь він доступний нам для спостережень.

Наступна важлива властивість Всесвіту базується на тому простому факті, що в просторі, який розширюється, частота фотона зменшується. Цей ефект широко відомий під назвою "*червоне зміщення*" або *ефект Доплера*: чим далі галактика від спостерігача, тим більше її спектральні лінії зміщені в червоний бік спектра.

Коротко опишемо динаміку розширення нашого Всесвіту. Основна сила, яка впливає на динаміку і керує розширенням, — це сила гравітації. Розподіл речовини в просторі в масштабах, що перевищують кілька сотень Мегапарсек (1 Мпк = 1 000 000 пк $\sim 3 \cdot 10^{24}$ см), однорідний, а властивості речовини не залежать від напрямку (ця властивість у космології називається *ізотропією*). Для опису динаміки виберемо спостерігача (будемо вважати, що він знаходиться в центрі) і пробну галактику, яка знаходиться на деякій відстані від спостерігача. У рамках ньютонівської теорії гравітації можна довести теорему про те, що на взаємний рух пробної галактики щодо спостерігача впливає тільки та речовина, яка знаходиться всередині кулі з радіусом, котрий дорівнює відстані від спостерігача до пробної галактики. Іншими словами, речовина, яка знаходиться поза цією кулею, на взаємне прискорення галактики щодо спостерігача не чинить ніякої дії!

Речовина, з якої складається сучасний нам Всесвіт, народилася і була "розігнана" приливними силами, що виникли під час **стадії інфляції** в ранньому Всесвіті. Тепер ця речовина, включаючи нашу "пробну" галактику, розлітається по інерції.

Звичайна речовина, яку добре вивчили фізики, має властивість тільки гравітаційного притягання. Це значить, що пробна галактика буде притягатися до спостерігача. Наявність притягання означає, що галактика, "відлітаючи" від спостерігача, повинна сповільнювати свій рух щодо цього спостерігача. **Розширення повинно бути уповільненим, а спостереження показують, що розширення нашого Всесвіту — прискорене!** Виходить, що всередині кулі присутня речовина, яка має властивість **антигравітації**. Новий вид речовини космологи назвали "темною енергією". Про неї ми поговоримо докладно в розділі "Прискорене розширення Всесвіту і новий вид матерії".

Відповідно до закону Габбла, Всесвіт розширюється, обсяг супутнього простору зростає. Важливо відзначити, що це розширення стає по-

мітним тільки на великих масштабах, більших за декілька Мпк. На менших масштабах переважають гравітаційні сили притягання.

Анізотропія і поляризація реліктового випромінювання

Реліктове випромінювання — "найстаріші" фотони у Всесвіті. Відповідно до сучасних уявлень космології, кілька мільярдів років тому відбувся "*Великий Вибух*". Простір нашого Всесвіту почав розширюватися експоненціально, тому з області економічної теорії був запозичений термін "*інфляція*". Це розширення визначалося одним або кількома скалярними полями. Після закінчення інфляційного періоду народжена з осциляцій скалярного поля речовина являла собою високотемпературну плазму, що остигала в міру розширення Всесвіту. Темп розширення був досить повільним для того, щоб частинки, які складають плазму, знаходилися в термодинамічній рівновазі.



Рис. 1. Схематичне зображення (у вигляді сфери) поверхні останнього розсіювання (космологічна фотосфера). В її центрі розміщено радіотелескоп, який спостерігає реліктові фотони, що були випущені цією поверхнею. Зовні поверхні останнього розсіювання знаходиться гаряча плазма.

Приблизно через триста тисяч років після "Великого Вибуху" основні частинки, що складають плазму, були такі: протони, нейтрони, електрони, нейтрино і фотони. Рівновага між протонами, електронами і фотонами підтримувалася електромагнітними силами за допомогою томсоновського розсіювання. До цього часу плазма остигла настільки, що стало енергетично вигідним утворення нейтрального водню. Протони й електрони об'єдналися, утворивши водень, і замість гарячої плазми виникла гаряча нейтральна речовина, що складається на 75 % з водню і 25 % з гелію. Перетин розсіювання фотонів у нейтральній речовині значно менший, ніж у плазмі.

Таким чином, рівновага між фотонами і навколишнім середовищем порушилася, фотони стали вільними частинками. Вони почали поширюватися в просторі вільно, практично не взаємодіючи з навколишньою речовиною. Такі фотони називаються *реліктовими фотонами* і являють собою найперше випромінювання, що народилося у Всесвіті.

Доки фотони знаходилися в рівновазі з навколишньою плазмою, у них сформувався *спектр абсолютно чорного тіла (планковський спектр)*. У ансамблі реліктових фотонів цей спектр зберігся, навіть коли вони вийшли з рівноваги. Тоді їхня температура складала близько 3 000 К. Наразі за причини розширення Всесвіту і спостережуваного червоного зміщення фотонів температура реліктового випромінювання складає 2,726 К.

Момент часу, коли порушується рівновага в первинній плазмі і фотони стають вільними, у космології називається по-різному. Єдиного терміну все ще не існує, ми ж будемо дотримуватися назви "*епоха рекомбінації*". До епохи рекомбінації вільний пробіг фотона невеликий, він значно менший від розмірів горизонту подій. Це пов'язано з тим, що вільний пробіг фотона в плазмі визначається перетином взаємодії з електронами плазми — перетин великий, тому довжина вільного пробігу мала. Після епохи рекомбінації перетин розсіювання фотона зменшується в багато разів, довжина вільного пробігу значно виростає і стає більшою від горизонту подій. З кожного шматочка плазми фотони, у якому вони були "заполонені" томсоновським розсіюванням, починають вільно поширюватися в усі сторони. Спостерігач через 13 мільярдів років приймає ці фотони вже на радіочастотах.

Кожен фотон, прийнятий астрономом, приходить з визначеної точки небесної сфери і з відстані, що майже дорівнює розміру горизонту частинок. Сукупне місце розташування цих точок утворює сферу в просторі. Космологи називають її *поверхнею останнього розсіювання або космологічною фотосферою*. Вона є найбільш віддаленим джерелом на небі і єдиним джерелом, усередині якого ми знаходимося (*рис. 1*).

Температура однорідна по поверхні останнього розсіювання. Міра однорідності дуже висока і складає кілька сотих процента. Проте на цій поверхні є невелика *різниця температури* — вона називається *анізотропією реліктового випромінювання*. Тут термін "*анізотропія*" означає різницю в температурі випромінювання, яку астрономи спостерігають у різних напрямках. Різниця в температурі поверхні для спостерігача виражається в різниці властивостей випромінювання, що приходить з різних напрямків. Ця анізотропія невелика, вона складає приблизно сотню мікрокельвінів. Але, як говориться, "*малий золотник, але дорогий*". Наукова інформація, яку дає нам вивчення анізотропії реліктового випромінювання, досить значна.

Наочне уявлення про генерацію анізотропії реліктового випромінювання можна одержати за допомогою простої аналогії. Космологічна фотосфера подібна до фотосфери зір. Поверхня зорі може *коливатися*, при цьому змінюється потік з поверхні — це основна ідея методу вивчення коливань речовини Сонця. Космологічна фотосфера теж *коливається*, що і приводить до анізотропії її температури. На *рис. 2* показано приклади коливань різних типів, які відповідають різним мультипольним числам (див. також *рис. 3* і *рис. 4* з поясненнями в статті *Е. Хога* "Вік світу за найбільш авторитетними свідченнями" у цьому числі журналу — *Ред.*).

Залежність амплітуди таких коливань від мультипольного числа може бути подана у вигляді графіка кутового спектра анізотропії реліктового випромінювання (*рис. 3*). Графік складається з кількох характерних частин: *плато Гаррісона—Зельдовича, першого, другого і третього доплерівського піків*. Амплітуда плато характеризує фізику раннього Всесвіту, амплітуда і положення доплерівських піків по горизонтальній осі залежать від глобальних параметрів нашого Всесвіту.

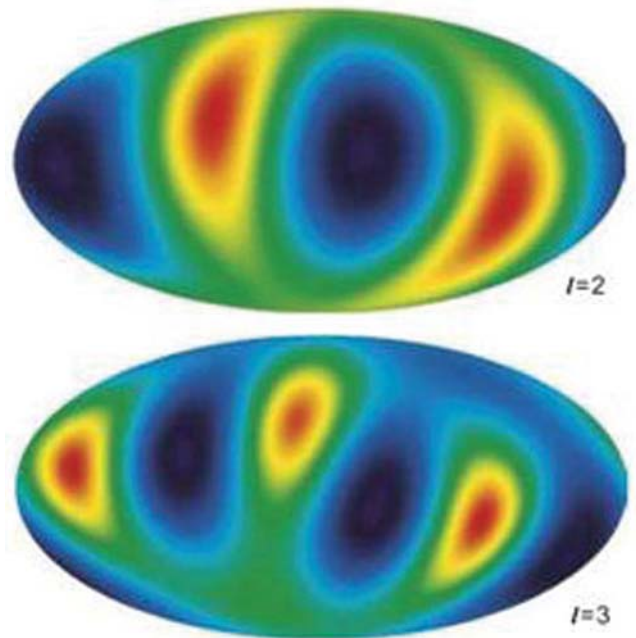


Рис. 2. Квадрупольний ($l = 2$) і октупольний ($l = 3$) розподіли температури по поверхні останнього розсіювання. Синій колір означає область пониженої температури, червоний — область підвищеної температури

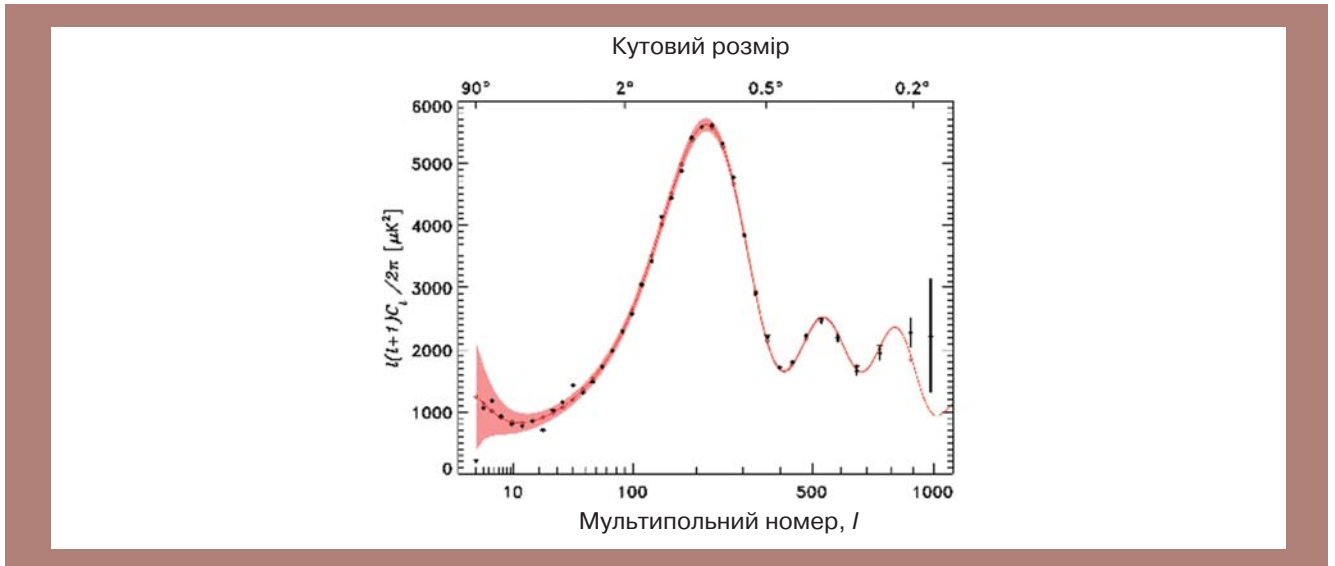


Рис. 3. Кутовий спектр анізотропії реліктового випромінювання, отриманий за результатами трирічної роботи космічного апарата WMAP. Нижня горизонтальна вісь — головне мультипольне число.

Чим більше це число, тим менше характерна шкала змінності температури, яка показана на верхній горизонтальній вісі в кутовій мірі. Вертикальна вісь — потужність відповідної гармоніки, виражена в температурних одиницях (мікрокельвінах в квадраті), нормоване на спектр Гаррісона—Зельдовича. Для горизонтальних вісей використано логарифмічний масштаб, для вертикальної вісі — лінійний.

В інтервалі мультипольних чисел $l = 2 - 60$ знаходиться плато Гаррісона—Зельдовича, при $l = 220$ — перший доплерівський пік, при $l = 550$ — другий доплерівський пік.

Чорними точками подано експериментальні дані; вертикальні відрізки означають похибки вимірювань. Видно, що у вимірюваннях для невеликих мультипольних чисел похибки невеликі, тоді як для чисел, близьких до $l = 1000$, похибки виходять на рівень даних вимірювань

Перша і найважливіша інформація, яку космологи одержують з кутового спектра анізотропії, — це вимір з великою точністю глобальних параметрів сучасного нам Всесвіту.

В першу чергу, це повна густина Всесвіту, співвідношення різних типів матерії, її складових і глобальна геометрія Всесвіту. Про все це можна судити з мультипольного спектра анізотропії реліктового випромінювання. Він же дає можливість космологам вимірювати властивості раннього Всесвіту і перевіряти теорії раннього Всесвіту, включаючи теорію суперструн.

Тут варто згадати внесок наших співвітчизників у побудову теорії раннього Всесвіту, в тому числі за допомогою анізотропії реліктового випромінювання. Насамперед необхідно згадати відомих радянських учених Я.Б. Зельдовича й А.Д. Сахарова, що вивчали спектр флуктуацій густини. Важливість цих досліджень важко переоцінити — з цих флуктуацій утворилися галактики, потім зорі, планети і, нарешті, ми з вами. Спектр флуктуацій, виявлений по анізотропії реліктового випромінювання, названо спектром Гаррісона—Зельдовича. Піки на спектрі мультипольних гармонік (рис. 3) іноді називають піками Сахарова.

І, нарешті, вивчаючи анізотропію реліктового випромінювання, можна зробити прогноз майбутнього розвитку нашого Всесвіту.

Анізотропія реліктового випромінювання була відкрита в експерименті "Релікт", проведеному в

Інституті космічних досліджень АН СРСР (ІКД АН СРСР). Керівником експерименту був І.А. Струков, у ньому також брали участь багато відомих учених, зокрема Д.П. Скулачов, що керував радіоелектронним підрозділом. Один із авторів цієї статті брав участь в обробці експерименту, тому про відкриття хочеться розповісти докладніше.

Супутник "Прогноз" з експериментом "Релікт" був запущений у 1984 р. і пропрацював півроку (рис. 4). Протягом цього часу було отримано огляд усього неба на частоті 37 ГГц. Дані, отримані в ході цього експерименту, оброблялися упродовж 8 років з періодичною публікацією проміжних результатів.

Наприкінці 1980-х рр. до обробки експерименту приєднався випускник ДАІШ МДУ А.А. Брюханов, тоді ж була побудована адекватна модель радіотракту і незабаром після того була виявлена анізотропія. Після першої появи "сигналу" ми ще більше року займалися моделюванням, перевіряючи різні гіпотези про природу виявленої анізотропії. Що це? Анізотропія на поверхні останнього розсіювання чи додатковий надлишок випромінювання, що виникає, наприклад, у нашій Галактиці? На ці запитання ми відповіли, порівнюючи карти радіояскравості Галактики, отримані іншими радіоастрономами в інших діапазонах.

Остаточне запитання було вирішене до кінця 1991 р. Це була дійсно анізотропія на поверхні останнього розсіювання.

У січні 1992 р. стаття з результатами експерименту була послана в журнал "Письма в Астрономический журнал" (вийшла в травні 1992 р.). Після того, як редколегія журналу прийняла статтю до друку, ми в січні 1992 р. розповіли про відкриття анізотропії реліктового випромінювання на семінарі в ДАІШ. Далі підготували і послали статтю про наше відкриття в журнал "Monthly Notices of Royal Astronomical Society", де статтю довго не приймали до друку. Перший варіант статті був отриманий редакцією 3 лютого 1992 р. Рукопис переглядався кілька разів. Варіант, перероблений в останній раз, був отриманий редакцією 3 липня 1992 р. і прийнятий до друку 10 липня 1992 р. Незважаючи на те, що на "рожевих" сторінках "Monthly Notices of Royal Astronomical Society" статті належить публікувати протягом 4 тижнів, ця стаття була знову затримана. Затримка призвела до того, що нашу статтю англійською мовою опублікували тільки у вересні 1992 р. **одночасно** з публікацією результатів із супутника "COBE".

У квітні 1992 р. керівник експерименту "COBE" Джордж Смут зібрав прес-конференцію, на якій оголосив про відкриття анізотропії реліктового випромінювання. Повідомлення було поширено по усьому світі засобами масової інформації як наукова новина номер один. Дж.Смут став героєм дня! Репортери присвячували цій події статті і з легкої руки одного з репортерів, котрий оголосив, що тепер людство побачило лик "Господа Бога", радіокарти "COBE" набули великої популярності, заповнивши навіть видання, далекі від науки. Хочеться усе-таки відзначити, що першим лик "Господа Бога" побачив випускник ГАІШ МДУ, наш співвітчизник Андрій Брюханов.

Обоє супутників знайшли тільки *великомасштабну* анізотропію. Характерний кутовий масштаб змінності температури реліктового випромінювання складав десятки градусів. Чутливості радіометрів двох апаратів були порівнянні: чутливість

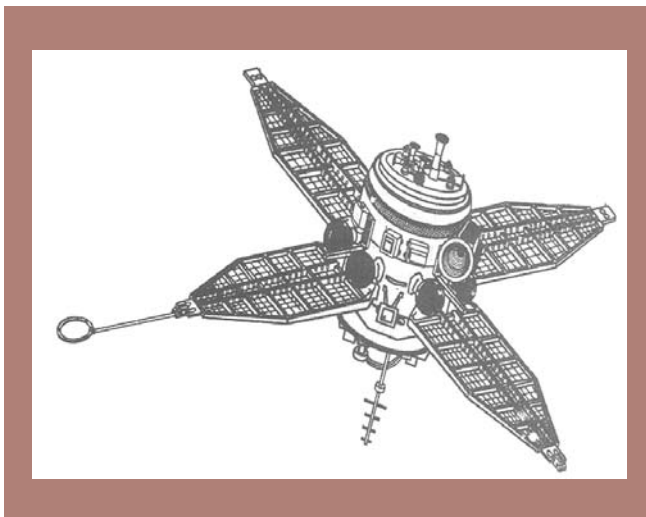


Рис. 4. КА "Релікт", за допомогою якого у 1992 р було відкрито анізотропію реліктового випромінювання

радіометра "Релікт" була в 1,3 рази гірше, ніж чутливість радіометрів "COBE". Останній працював на орбіті 4 роки, "Релікт" — півроку, чим і була викликана різна чутливість двох апаратів, а також різні відношення "сигнал/шум" у двох кінцевих картах неба. Ми знайшли на небесній сфері аномально холодну область (**рис.5**). Вона проглядається на карті "COBE", а також на карті, побудованій за результатами останнього експерименту WMAP. В експерименті "Релікт" було досягнуто відношення "сигнал/шум", що дорівнює трьом. У результатах експерименту "COBE", опублікованих одночасно з результатами експерименту "Релікт", відношення "сигнал/шум" складало приблизно п'ять (фактично навіть трохи менше). Результати "COBE" мали більшу вірогідність і помилка сигналу була меншою, однак довірчі інтервали даних "Релікта" і "COBE" перетиналися в широкому діапазоні.

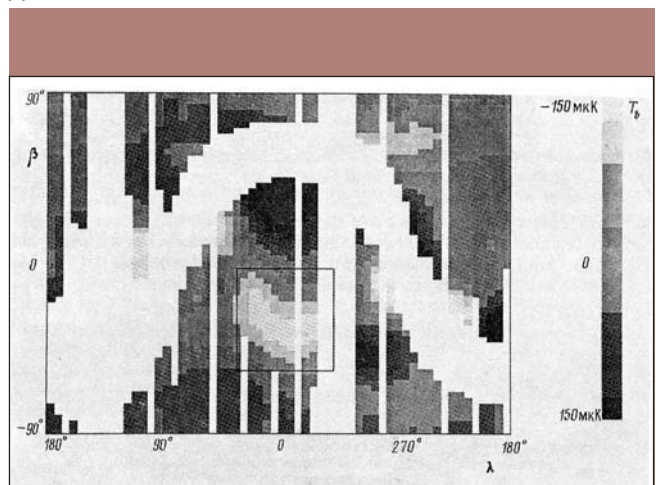


Рис. 5. Карта усього неба в мікрохвильовому діапазоні, отримана за даними супутника "Релікт". Велика біла смуга, що перетинає карту, — це зображення нашої Галактики, вирізане з карти під час аналізу анізотропії реліктового випромінювання.

У нижній частині карти квадратом відмічено область пониженої температури, що присутня як на пізніших картах "COBE", так і на останніх картах WMAP

Анізотропія реліктового випромінювання, відкрита в експериментах "Релікт" і "COBE", була підтверджена низкою більш пізніх експериментів, найважливішим з яких став останній експеримент WMAP. Необхідно також згадати, принаймні, два балонних експерименти: "Boomerang" (головний дослідник — П. де Бернардис, Університет м. Рим, Італія) і "Archeops" (головний дослідник — Ален Бенуа, Франція).

У зв'язку з великим евристичним значенням відкриття анізотропії реліктового випромінювання для космології і фізики керівникам проекту "COBE" Дж. Мазеру і Дж. Смуту була присуджена Нобелівська премія з фізики за 2006 рік.

Прискорене розширення Всесвіту і новий вид матерії

Наприкінці XX ст. астрономи вимірили характеристики Всесвіту за надновими зорями (SN) типу *Ia*. Висновки були несподіваними. Виявляється, зараз наш **Всесвіт розширюється, причому розширюється прискорено**. Чому це відкриття виявилось шоком, чому це так важливо для сучасної космології і фізики, — читайте далі.

Спочатку кілька слів про самі зорі типу *SN Ia*. Наднові зорі — це зорі, що вибухають. Їхня яскравість за один день наростає так сильно, що стає порівнянною з яскравістю цілої галактики, після чого яскравість спадає протягом кількох місяців. Наднові зорі поділяються на два типи — I і II, які, в свою чергу, поділяються на кілька підтипів. Зорі типу *SN Ia* відрізняються від інших тим, що форма їхньої кривої блиску у максимумі корелює зі світністю в максимумі блиску. Отже, за формою кривої блиску можна вимірити світність зорі, а порівнюючи світність з потоком, обмірюваним спостерігачем, можна знайти відстань до зорі. Тому *SN Ia* іноді називають "стандартною свічею". Точність визначення світності складає приблизно 15 %, що дає дуже хорошу можливість виміру відстаней до цих зір. У сукупності з їхньою яскравістю це дозволяє астрономам побудувати шкалу космологічних відстаней з великою точністю. Спектр випромінювання *SN Ia* дає змогу точно вимірити швидкість віддалення зорі, а отже і галактики, якій вона належить. Таким чином, можна вимірювати швидкість розбігання далеких галактик чи, іншими словами, кінематичні характеристики нашого Всесвіту.

Повторення вимірів *Е. Габбла* на новому індикаторі відстаней, що до того ж має властивості "стандартної свічі", дозволяє точно вимірити параметри розширення нашого Всесвіту.

Виміри показали, що параметр Габбла дорівнює 72 ± 5 км/сек/Мпк. Але найбільш дивним є те, що похідна швидкості розширення виявилася позитивною, тобто Всесвіт розширюється прискорено. Це відкриття було підтверджено декількома групами. Хочеться згадати групу французьких астрономів, що також спостерігала наднові зорі і використовувала ці дані для вивчення кінематичних властивостей нашого Всесвіту.

Не можна сказати, що космологи не були готові до такої ситуації: прискорене розширення повинно було бути в ранньому Всесвіті (в так звану епоху інфляції), воно стало тією рушійною силою, що "розігнало" речовину нашого Всесвіту. Після епохи інфляції Всесвіт розширювався за степеневим законом, тепер же знову розширюється з прискоренням.

Крім того, задовго до обговорення проблем раннього Всесвіту і теорії інфляції *А. Айнштейн* увів поняття *лямбда-члена* — нової універсальної

сталої поряд з такими сталими, як швидкість світла чи гравітаційна стала. Айнштейну ця стала знадобилася для створення стаціонарної космологічної моделі. Однак під впливом ідей *О. Фрідмана* про нестационарний Всесвіт, що розширюється, він відмовився від штучного введення цієї константи. Але чудово ця константа виявилася затребуваною пізніше, під час обговорення ідей теорії інфляції і при поясненні особливостей розширення сучасного Всесвіту.

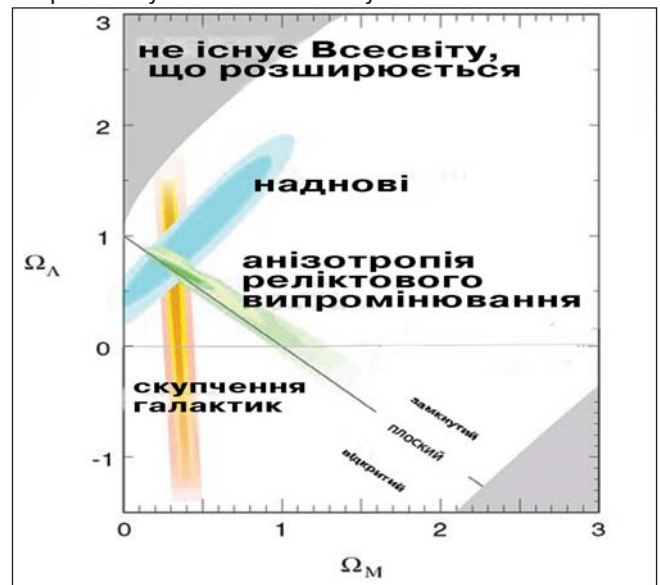


Рис. 6. Діаграма показує, як за допомогою спостережень можна аналізувати співвідношення густини "темної енергії" і густини всієї матерії, яка містить у собі "звичайну", тобто баріонну, матерію і "темну матерію".

Декілька незалежних тестів — по анізотропії реліктового випромінювання, по надновим зорям, по скупченням галактик — показують, що наш Всесвіт є тривимірно-плоским (описується евклідовою геометрією) і що його повна маса на 70 % складається з "темної енергії" і на 30 % з матерії (рисунок взятий із сайту проекту *SNAP*).

Повернемося до обговорення прискореного розширення. Чому цей факт є таким важливим як для космології, так і для фізики? У першому параграфі було сказано, що для його пояснення необхідна присутність матерії нового типу — речовини, що має властивість антигравітації і яку космологи назвали "темна енергія" (рис. 6). Розглянемо таку речовину і його властивості більш докладно.

У космології властивості всякої речовини характеризуються двома функціями: густиною енергії і тиском. Причому тиск вважається паскалевим, тобто однаковим у всіх напрямках або ізотропним. Тиск на деяку площадку, поміщену в середовище, що має ці ізотропні властивості паскалевого тиску, не залежить від орієнтації площадки. Якщо взяти бляшану банку, відкачати з неї повітря і занурити у воду, то тиском води банка буде стиснена. Причому це не буде стиск уздовж сили ваги чи уздовж якогось іншого виділеного

напрямку. Це буде стиск з усіх боків — характерний стиск, властивий тиску, відкритому французьким фізиком Паскалем. Тиск повинен бути ізотропним, оскільки в іншому випадку наш Всесвіт став би анізотропним. Саме тому в космології розглядається тільки такий тиск.

Мікрвзаємодія між частинками речовини, що заповнюють простір, звичайно не розглядається, оскільки дуже слабо впливає на динаміку Всесвіту. Усереднені характеристики цих мікрвзаємодій визначають тиск. Тиск уже може істотно впливати на темп розширення, оскільки це енергія взаємодії, і, як усяка енергія, вона має масу, що дає внесок у силу притягання. Причому тиск дає позитивний внесок у масу.

Чи може тиск давати негативний внесок? Так, може, якщо тиск негативний. Що це таке — негативний тиск і який його фізичний сенс?

Надуйте повітряну кульку. У ній тиск повітря позитивний, причому цей тиск більший, ніж у навколишнього повітря. Внутрішній тиск повітря прагне розширити кульку, тоді як поверхневі сили натягу оболонки перешкоджають необмеженому розширенню. Негативний тиск буде намагатися

роздавити кульку — ось основна різниця. Іншими словами, негативний тиск — це позитивний натяг. Натяг — теж дуже відома властивість матеріалів. Наприклад, розтягуючи шматок гуми, експериментатор викликає в ній позитивний натяг уздовж лінії розтягання. Важлива відмінність від рідини в цьому прикладі полягає в тому, що натяг анізотропний. Уздовж лінії розтягання він великий, а поперек — малий, хоча і не дорівнює нулю.

Обговоримо, який внесок у масу дають сили натягу. Для пояснення цього питання розглянемо дві вільні елементарні частинки — протон і нейтрон, і ті ж частки, об'єднані в атом дейтерію. Маса протона складає 938,3 МэВ, нейтрон більш важкий і його маса дорівнює 939,6 МэВ. Сума мас вільних частинок є 1 877,9 МэВ. А маса дейтрона менша і складає 1 875,6 МэВ! Інакше кажучи, маса частинок, зв'язаних в атомне ядро, зменшилася на 2,3 МэВ. Для двох вільних елементарних частинок і двох частинок, зв'язаних у ядро дейтерію, різниця непомітна, однак для одного моля речовини це вже цілком вимірна різниця в масі. Сила, що стримує протон і дейтрон у ядрі, — це сила притягання, іншими словами — це сила натягу.



Рис. 7. Модель розширення Всесвіту за різних умов (Всесвіт, що уповільнюється, і Всесвіт, який прискорено розширюється).

Справа наведено графік залежності масштабного фактора Всесвіту в залежності від рівняння стану "темної енергії". Світло-жовта лінія ($w = -0,85$) відповідає моделі розширення Всесвіту, якщо роль "темної енергії" відіграє квінтесенція; синя лінія ($w = -1$) відповідає випадку, коли прискорене розширення забезпечується лямбда-членом — новою фундаментальною константою. Нарешті, червона лінія ($w = -1,15$) описує випадок, коли прискорене розширення нашого Всесвіту в майбутньому буде відбуватися за рахунок "фантомної енергії".

Рисунок взято із сайту проекту SNAP.

При цьому сила натягу, що виникає між протоном і нейтроном, зменшує інерціальну масу ядра дейтерію. Але зменшення інерціальної маси еквівалентне зменшенню маси гравітаційної — маси, що забезпечує притягання! Отже, позитивний натяг (негативний тиск) зменшує масу речовини і зменшує притягання з боку цієї маси.

Для того щоб створити негативну гравітаційну масу, необхідний дуже сильний — релятивістський — *негативний тиск*. Крім того, в однорідному і ізотропному Всесвіті цей тиск повинен бути паскалевим. Аналог такого негативного тиску відомий у лабораторній фізиці — це явище *кавітації*, котре кожен міг спостерігати, коли гріб веслом, катаючись на човні. Під час гребка у воді виникає безліч пухирців — це і є кавітація — тиск у цьому процесі негативний, пухирці швидко "ляскають". Крім того, тиск є паскалевим. Звича-

йно, у такому процесі тиск значно менший, ніж густина енергії (яка в космології містить у собі густину енергії спокою).

Сильний негативний тиск може виникати в новому виді матерії — скалярному полі. Для цього поле повинне бути не лише скалярним, але і мати визначений вид потенціалу. Такі поля в теоретичній фізиці відомі, вони докладно вивчалися в останні роки.

Щодо космології, скалярне поле, назване "*інфлатон*", відповідає за експонентне розширення раннього Всесвіту. Відповідно до останніх теоретичних досліджень, у ранньому Всесвіті могло існувати не одне таке поле, а декілька; їхнє існування впливає з *теорії суперструн*, що у даний момент дає найбільш повну, єдину і несуперечливу картину фізичного світу. Теорія суперструн дозволяє об'єднати усі відомі фізичні взаємодії. Так би мовити, одним із "побічних

ефектів" цієї у всіх відношеннях привабливої теорії є той факт, що вона несуперечлива тільки в просторах з числом вимірів більше чотирьох.

При спробі застосувати теорію суперструн до опису еволюції раннього Всесвіту і появляються додаткові скалярні поля, у тому числі поля, відповідальні за інфляційну стадію і, цілком можливо, за прискорене розширення нашого Всесвіту у сучасну нам епоху. Таким чином, у рамках теорії суперструн розширення Всесвіту виходить природно як один з наслідків цієї теорії. Інфляційна модель прекрасно підтверджується спостережними даними з реліктового випромінювання і великомасштабної структури, але саме інфляційне скалярне поле, безумовно, вимагає природного фізичного обґрунтування і без прив'язки до теорії суперструн воно вводиться вимушено, що називається "вручну".

Моделі, що описують прискорене розширення Всесвіту, поділяються на декілька типів. Загальна їхня властивість полягає в тому, що *тиск є негативним*.

Як показують експериментальні дані, негативний тиск лежить у межах $-1,62 \rho c^2 < p < -0,74 \rho c^2$,

де p — це тиск, ρ — густина, c — швидкість світла.

Причому якщо тиск лежить у межах

$-0,74 \rho c^2 < p < -\rho c^2$, то така речовина познача-

ється терміном *квінтесенція*.

Якщо виконується точна рівність $p = -\rho c^2$,

то це *модель з лямбда-членом*,

якщо $-1,62 \rho c^2 < p < -\rho c^2$, то така матерія називається "*фантомною енергією*" (*рис. 7*).

У сучасній науковій літературі *квінтесенцію* і *лямбда-член* прийнято називати узагальненим терміном "*темна енергія*", у такий спосіб ніби протиставляючи їхній найбільш екзотичній "*фантомній енергії*". Однак термінологія ще не устоялася: адже космологи мають справу з зовсім новими, що зовсім недавно народилися, поняттями.

Квінтесенція — незвична форма матерії — не суперечить відомим фізичним законам. Модель з лямбда-членом уже вимагає введення нової універсальної сталої. "*Фантомна енергія*" порушує один з основних принципів фізики — *умову енергодомінантності*. При порушенні енергодомінантності, наприклад, може виникнути машина часу, реалізована у вигляді "*кротячої нори*" ("*кротяча нора*" — це структура, аналогічна чорній дірі, що працює як на "вхід", так і на "вихід", в такий спосіб з'єднуючи дві області простору горловиною).

Астрономи планують нові високоточні спостереження. Для цього, як ми вже згадували вище, в США розроблено міжнародний *проект "SNAP"*.

Це буде спеціальний космічний телескоп діаметром 2 м (розміри і характеристики якого ще на стадії обговорення), оснащений найсучаснішими приймачами випромінювання. Два поля глибокого огляду на півночі і півдні будуть складати 7,5 квадратних градусів кожне, при цьому глибина проникнення буде відповідати зоряній величині $m_{AB} = 30,3$. Огляд широкого поля складе 1 000 квадратних градусів при глибині $m_{AB} = 27,7$ і, нарешті, панорамний огляд дозволить оглянути 10 000 квадратних градусів при глибині проникнення $m_{AB} = 26,7$. Це значно краще, ніж у всіх сучасних космічних телескопів, а також багатьох наземних проектів.

Космічна лабораторія з такими характеристиками дасть можливість відкрити кожного року спостережень понад 2 000 наднових зір. Крім того, передбачається широке дослідження гравітаційних лінз. Об'єднання досліджень наднових зір і гравітаційних лінз дозволить визначити склад нашого Всесвіту з точністю краще 1 %, виміряти рівняння стану "темної енергії" з точністю приблизно 4 % і дослідити (чи хоча б одержати верхню межу на варіації) тимчасові зміни рівняння стану з точністю 10 % за характерний час життя Всесвіту.

Якщо проект "SNAP" буде реалізовано, точність виміру глобальних кінематичних параметрів Всесвіту підвищиться в багато разів, що дасть змогу відповісти на багато фундаментальних запитань фізики і космології.

(*продовження статті читайте в наступному числі журналу*)