

# РЕЛІКТОВЕ ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ

## від гіпотези Гамова до космічного телескопа “Планк”

**2010**-й рік обіцяє людству сенсаційні відкриття у фундаментальних галузях знань — фізиці мікросвіту та космології.

Справді, у листопаді 2009-го розпочав роботу найскладніший і найдорожчий прилад на Землі — *Великий адронний колайдер*. Можливо, уже навесні 2010 буде експериментально підтверджено існування *бозонів Гігса*, відкрито *частинки темної матерії*, або ще щось, про що ми й не здогадуємося. Восени того ж року розпочав роботу ще один унікальний прилад — *космічний телескоп Планк*. Правда, це відбулося без такого громадського резонансу, як це було із запуском Великого адронного колайдера, хоч його вартість і значення для науки не менші. З відстані у 1.5 млн. км він передаватиме на Землю дані вимірювань температури і поляризації *реліктового випромінювання*, яке надходить з кожної ділянки неба. Наскільки важливе значення для фундаментальної науки має вивчення цього випромінювання свідчить хоча би той факт, що за його дослідження уже двічі присуджувалась Нобелівська премія — у 1978 і 2006 роках. Іншим свідченням може бути число незалежних експериментів — понад 50 за останніх 25 років — наземних, стратосферних, косміч-

них. Ще одним — число публікацій в наукових журналах. Про важливість цієї галузі досліджень, сучасний стан і перспективи хочеться розказати читачам “Світогляду”, оскільки ця галузь знань значною мірою визначає наше розуміння будови та походження Всесвіту, наукову картину світу, а, отже, наш світогляд.

### Гіпотеза Гамова

Вперше ідея існування реліктового випромінювання була висунута у 1946 році *Георгієм Гамовим* (рис. 1), уродженцем Одеси, який переїхав до США за дванадцять років до того. Він вважав, що на ранніх стадіях розширення Всесвіт був гарячим, а наслідком такої фази повинно бути залишкове теплове випромінювання. Разом зі своїми учнями *Р. Алфером* і *Р. Германом* він використав цю гіпотезу у 1948 р. для пояснення синтезу всіх елементів таблиці Менделєєва та їх ізотопів на самому початку розширення (див. додаток “Розширення Всесвіту”), коли густина і температура були достатньо високими для протікання реакцій синтезу важких елементів із легших приєднанням вільних нейтронів та протонів. Із плином часу теплове випромінювання охолодилося внаслідок розширення Всесвіту так,



**Богдан Новосядлий**  
доктор фіз.-мат. наук,  
директор  
Астрономічної обсерваторії  
Львівського національного  
університету  
імені Івана Франка,  
м. Львів

що його сучасна температура за їх оцінками становила 5-6 К. Ці ідеї заклали основу гарячої моделі Всесвіту. Згідно з сучасними уявленнями, в ранню епоху — перші три хвилини після Великого Вибуху — синтезувались тільки легкі елементи: водень, гелій, літій та їх ізотопи. Всі інші елементи синтезувались значно пізніше, в надрах зір та в спалахах наднових зір.

Гамов, однак, не вірив у можливість експериментального підтвердження висунутої ним гіпотези про існування теплового реліктового випромінювання. Він вважав, що енергетичний розподіл сумарного випромінювання зір, міжзоряного газу та пилу є таким самим, а інтенсивність більша, тому виділити на цьому фоні реліктове випромінювання практично неможливо. Очевидно, саме тому майже 15 років ніхто із астрономів-спостерігачів не зробив спроби виявити це випромінювання експериментально.

І лише у 1964 р. в журналі “Доклади Академії наук СРСР” з'явилася стаття “Средняя плотность излучения в метагалактике и некоторые вопросы релятивистской космологии”, в якій зроблено детальний аналіз співвідношень інтенсивностей випромінювання галактик і реліктового випроміню-

вання. Кроуфорд Гіл. Автори статті — *Андрій Дорошкевич* та *Геор Новіков*, науковці-початківці тоді, всесвітньо відомі вчені тепер. Незалежно до такого ж висновку прийшли британські астрофізики *Ф. Гойл* та *Р. Тейлер*, стаття яких вийшла того ж року у вересневому номері “Nature”. На початку 1965 р. група астрофізиків із Принстона (США) — *Р. Дікке*, *П. Дж.Е. Піблс*, *П. Ролл* та *Д. Вілкінсон* — розпочала створення антени для пошуку реліктового випромінювання. Вони перші підійшли до постановки цілеспрямованого експерименту з реєстрації реліктового випромінювання, але, за іронією долі, не вони стали його першовідкривачами.

### Відкриття реліктового випромінювання. Перша Нобелівська премія

Радіофізики *Роберт Вілкінсон* та *Арно Пензіас* (рис. 2), які працювали в лабораторії компанії “Белл” в Кроуфорд Гіл (США), у 1964 році готували найчутливіший на той час радіотелескоп для вивчення Галактики на довжині хвилі  $\sim 21$  см. Для точних вимірювань галактичного радіовипромінювання необхідно було вивчити всі

довжині хвилі, на своє здивування навесні 1964 року вони виявили сигнал, рівень якого не залежав ні від напрямку на небі, ні від сезону, коли проводились спостереження. Вони ще раз перевірили всю приймальну апаратуру, демонтували і почистили антену, але сигнал був незмінним. І лише тоді, коли переконалися, що це не шуми антени і приймальної апаратури, звернулися до принстонської групи за допомогою в інтерпретації цього сигналу.

*Дікке* з колегами відразу зрозуміли, що *Пензіас* і *Вільсон* зареєстрували теплове випромінювання раннього Всесвіту, а їм залишилось підтвердити це відкриття своїм телескопом. Обидві групи вирішили опублікувати в *Astrophysical Journal* два короткі повідомлення: одне про результати вимірів, друге — їхню інтерпретацію в світлі гіпотези Гамова. Обидві статті вийшли в одному номері влітку 1965 р. Повідомлення *Пензіаса* і *Вільсона* називалось “Вимірювання надлишкової температури антени на 4080 Мгц” і зайняло всього 1.5 сторінки. В ній автори описали лише результати вимірювань шумів, вказали надлишкову температуру  $3.5 \pm 1$  К, а за інтерпретацією відіслали до супутньої стат-



Рис. 1. Георгій (Джордж) Гамов (1904-1968) — першим запропонував модель гарячого Всесвіту та передбачив існування реліктового випромінювання

вання, та показано, що його можна зареєструвати на довжинах хвиль від кількох сантиметрів до кількох міліметрів, де вклад від випромінювання галактик мінімальний. В ній також було вказано на якому із діючих у світі інструментів можна зареєструвати це випромінювання — на двадцятифуттовому рефлекторі лабораторії “Белл” в

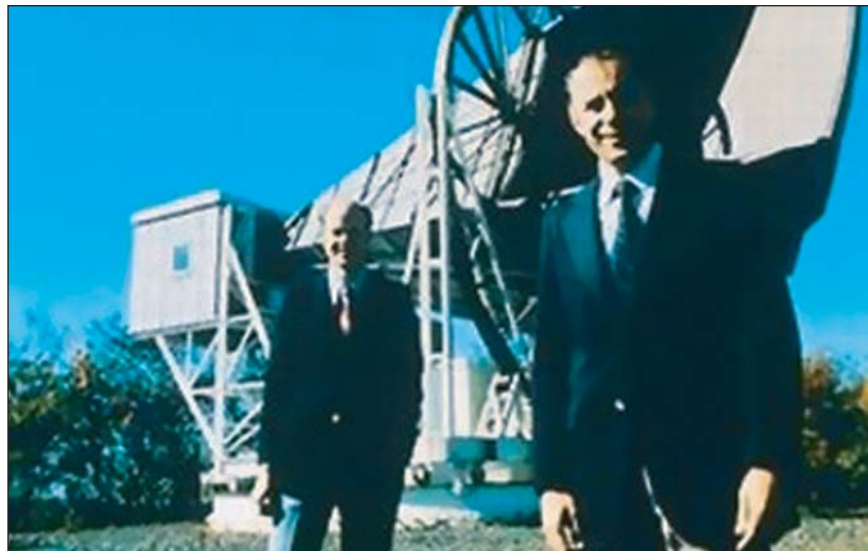


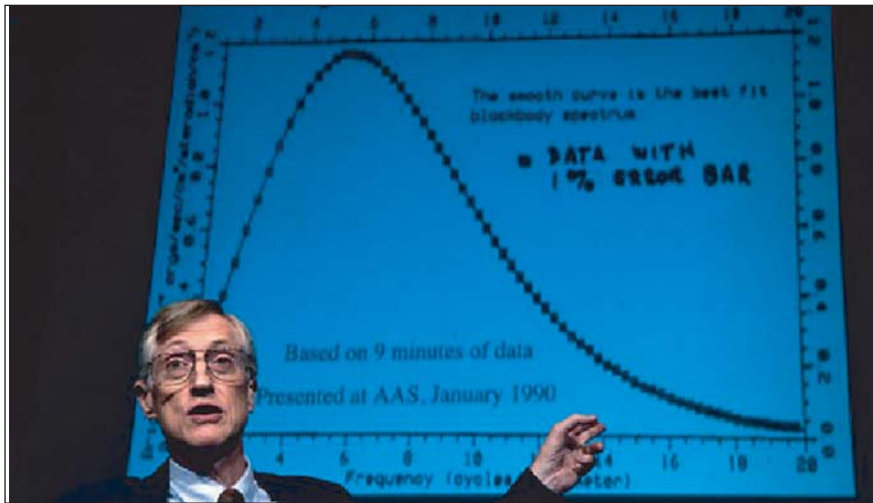
Рис. 2. Роберт Вільсон (зліва) і Арно Пензіас (справа), Великобританія. Нобелівські лауреати з фізики за 1978 рік “за відкриття реліктового електромагнітного випромінювання” (позаду них — мікрохвильовий приймач радіотелескопа)

джерела завад та шумів — наземні, атмосферні, апаратурні. Для цього вони переналаштували приймач на довжину хвилі 7,35 см, на якій галактичне випромінювання практично відсутнє.

Усунувши всі можливі шуми в приймачі та електричних колах, вичленивши свічення атмосфери на цій

ті *Р. Дікке*, *П. Дж.Е. Піблса*, *П. Ролла* і *Д. Вілкінсона* “Космічне теплове випромінювання” (5 стор.).

Так скромно і буденно було зроблено повідомлення про фундаментальне відкриття, автори якого, *Арно Пензіас* і *Роберт Вільсон*, у 1978 році отримали Нобелівську премію.



### Фізична природа та властивості реліктового випромінювання. Друга Нобелівська премія

В наступних експериментах було підтверджено існування електромагнітного випромінювання, яке надходить на Землю зі всіх ділянок неба практично з однаковою інтенсивністю. Важливою задачею стало вивчення його енергетичного розподілу, тобто залежності інтенсивності від довжини хвилі. Проведені уже в наступні роки виміри показали, що така залежність добре описується функцією Планка розподілу інтенсивності абсолютно чорного тіла з температурою близько трьох градусів Кельвіна ( $-270^{\circ}\text{C}$ ). *Холодний Всесвіт? Тепер так, але гарячий в минулому.* Річ у тому, що Всесвіт, який розширюється, поступово охолоджується. Коли Всесвіту було 400 тисяч років, температура цього випромінювання становила 3000 градусів Кельвіна. Ще менший вік — ще більша температура. *Атоми, які складаються з електронів, що обертаються довкола ядер, існують в таких умовах не могли.* Енергія фотонів випромінювання була така велика, що вони легко “позбивали” електрони з їхніх орбіт в атомах, утворивши плазму з ядер атомів та вільних електронів. Фотони розсіювались на них як світло в тумані, тому середовище було непрозоре для випромінювання. *Таку плазму називають баріонно-фотонною* (баріонами називають протони та нейтрони, з яких складаються ядра атомів). Якщо повернутися до ще ранішої епохи — першої секунди після Великого Вибуху, то температура тоді становила уже десять мільярдів градусів Кельвіна. В таких умовах вже навіть ядра елементів існувати не могли. Фотони руйнували і їх. Проте умови в наступні три хвилини були придатними для

синтезу легких елементів — водню, гелію, літію та їх ізотопів. *Цей етап життя Всесвіту — перші три хвилини — називають епохою нуклеосинтезу.* Зі спостережуваного співвідношення концентрацій гелію та дейтерію до водню в міжгалактичному середовищі можна отримати значення середньої густини баріонної речовини: виявилось, що вона становить всього  $\sim 5\%$  від повної середньої густини Всесвіту. У ще ранішу епоху, скажімо, одну мільярдну частку секунди, фотони мали таку енергію, що руйнували протони і нейтрони (нуклони), розкладаючи їх на кварки та глюони. Так, *в одному з експериментів на Великому адронному колайдері планують вперше дослідити матерію у формі кварк-глюонної плазми.* Можливо уже цього року буде оголошено про його результати. Отже, виявлене *фонове електромагнітне випромінювання таке вказує на існування гарячої ранньої фази еволюції Всесвіту.*

Для кількісного опису ранніх стадій еволюції Всесвіту важливо було встановити точне значення температури та можливі відхилення від планківського розподілу в окремих ділянках спектра по всьому небу. З цієї метою було проведено понад 50 експериментів. *Найбільш повно і точно ця задача була розв'язана за допомогою спеціально створеного для таких досліджень спектрометра мікрохвильового і далекого інфрачервоного діапазону для абсолютних вимірювань спектра реліктового випромінювання, який був поміщений на космічній обсерваторії COBE (COsmic Background Explorer), створеній НАСА і виведеній на геліосинхронну орбіту 18 листопада 1989 року.* Було доведено, що *спектр реліктового випромінювання є планківським у широкому діапазоні довжин хвиль (0.05–10 см) та однаковим по всьому небу. З великою точністю виміряно його температуру  $T=2.725\pm 0.002\text{ K}$ .*

**Рис. 3. Джон Мазер (1946 р.н.), науковий керівник проекту з абсолютних вимірювань спектра реліктового випромінювання COBE FIRAS, лауреат Нобелівської премії з фізики за 2006 р.**

Задача була надзвичайно складною: такі вимірювання можна було провести тільки при температурі не вищій  $1.5\text{ K}$  та врахувати велике число джерел переднього фону, які є завданнями для таких вимірів. Значущість результатів цих досліджень для космології підтверджена присудженням Нобелівської премії з фізики за 2006 рік *Джону Мазеру*, автору ідеї та керівнику проекту (рис. 3).

Максимум інтенсивності випромінювання при такій температурі є на довжині хвилі  $1.1\text{ мм}$ . Його густина енергії становить  $4\cdot 10^{-13}\text{ ерг/см}^3$  (400 фотонів в одному кубічному сантиметрі). *В середньому на кожен елементарну частинку у Всесвіті припадає мільярд квантів реліктового випромінювання.* Це природний космічний мікрохвильовий фон.

Порівняємо густину енергії цього випромінювання з густиною випромінювання мобільного телефону, робоча частота приймання-передачі сигналів якого відповідає мікрохвильовому діапазону довжин хвиль. Мінімальна потужність випромінювання мобільних телефонів під час розмови становить  $0.15\text{ Вт}$ . На відстані  $1\text{ см}$  від антени густина енергії цього випромінювання становить  $4\cdot 10^{-6}\text{ ерг/см}^3$ , що у десять мільйонів разів перевищує космічний мікрохвильовий фон. Лише на відстані  $30\text{ м}$  від мобільного телефону густина енергії його випромінювання така сама, як реліктового випромінювання.

**Чому ж таким важливим для науки є відкриття реліктового випромінювання та дослідження його фізичних властивостей?**

По-перше, це відкриття стало остаточною підтвердженням нестационарної моделі Всесвіту, теоретично передбаченої Фрідманом та експериментально підтвердженої Габблом (див. вставку).

У стаціонарному Всесвіті таке випромінювання з планківським спектром не згенерується, оскільки відсутні фізичні механізми для цього. По-друге, відсутність помітних спотворень планківського спектра вказує на те, що після одного місяця з початку розширення Всесвіту ніяких помітних виділень енергії нетеплового характеру (розпад частинок, випаровування

первинних чорних дір, акреція та ін.) не було. Тобто, спектр реліктового випромінювання справді сформувався у ранню епоху, коли вік Всесвіту не перевищував 1 місяця. По-третє, на ранніх стадіях свого розширення він був гарячим і проходив послідовні стадії синтезу баріонної речовини з кварк-глюонної плазми, синтезу ядер легких елементів, баріонно-фотонної плазми, космологічної рекомбінації, епохи атомів, епохи формування перших зір та галактик. По-четверте, висока ізотропія і однорідність реліктового випромінювання у масштабах, що значно перевищують розміри причинно-зв'язаних ділянок (див. вставку "Проблема горизонту"), вказує на існування ще однієї важливої стадії розширення Всесвіту — інфляції. По-п'яте, отримане точне значення температури реліктового випромінювання дало можливість узгодити теоретичні моделі ранніх стадій еволюції Всесвіту із великим числом фізичних характеристик Всесвіту, визначених на основі даних радіо-, оптичних та рентгенівських спостережень. Показана на рис. 4 схема еволюції Всесвіту вималювана на основі аналізу фізичних процесів, пов'язаних із взаємодією теплового випромінювання з речовиною у Всесвіті, що розширюється. І це ще далеко не повна інформація про Всесвіт, отримувана з дослідження реліктового випромінювання. Не менш важливе значення для науки має вивчення його ледь помітної анізотропії — залежності температури і поляризації реліктового випромінювання від напрямку на небі.

### Анізотропія реліктового випромінювання. Друга Нобелівська премія

Теоретичні розрахунки, підтвержені спостережуваними даними, свідчать, що реліктове випромінювання надходить на Землю, розсіявшись останній раз на вільних електронах, коли ще не було ні зір, ні галактик, ні їх скупчень. Воно почало вільно поширюватися, коли відбувся перехід атомів водню від іонізованого стану до нейтрального внаслідок розширення і охолодження. Цей період в історії Всесвіту називають космологічною рекомбінацією. Вона відбувалась одночасно у всьому Всесвіті, коли його вік

становив  $t_r=380$  тис. років (відраховується від моменту Великого Вибуху). Тривалість рекомбінації  $\sim 50$  тис. років. З того часу теплове випромінювання вільно поширюється так, що в кожний момент часу  $t > t_r$  воно надходить у кожен точку із усіх напрямків з відстані  $\sim 3c(t - t_r)$ . Тут  $c$  — швидкість світла (300 000 км/с), а коефіцієнт 3 з'явився внаслідок того, що за час поширення  $(t-t_r)$  відстань до точки останнього розсіювання зростає майже в 3 рази через розширення Всесвіту. Таким чином, у сучасну епоху, коли вік Всесвіту становить  $t_H = 13.7$  млрд. років, реліктове випромінювання надходить зі сферичного шару довкола нас,

товщина якого значно менша за відстань до нього. Його називають сферою останнього розсіювання реліктового випромінювання (показана на рис.4).

Виявлена висока ізотропія реліктового випромінювання вказує на високу однорідність речовини на сфері останнього розсіювання. Але в сучасну епоху ми спостерігаємо цілком протилежну картину — речовина зібрана в зорях, галактиках, скупченнях галактик. Вони сформувались і існують завдяки гравітації — силі притягання між тілами, яка пропорційна до бутку мас тіл і обернено пропорційна квадрату відстані між ними. Така ж

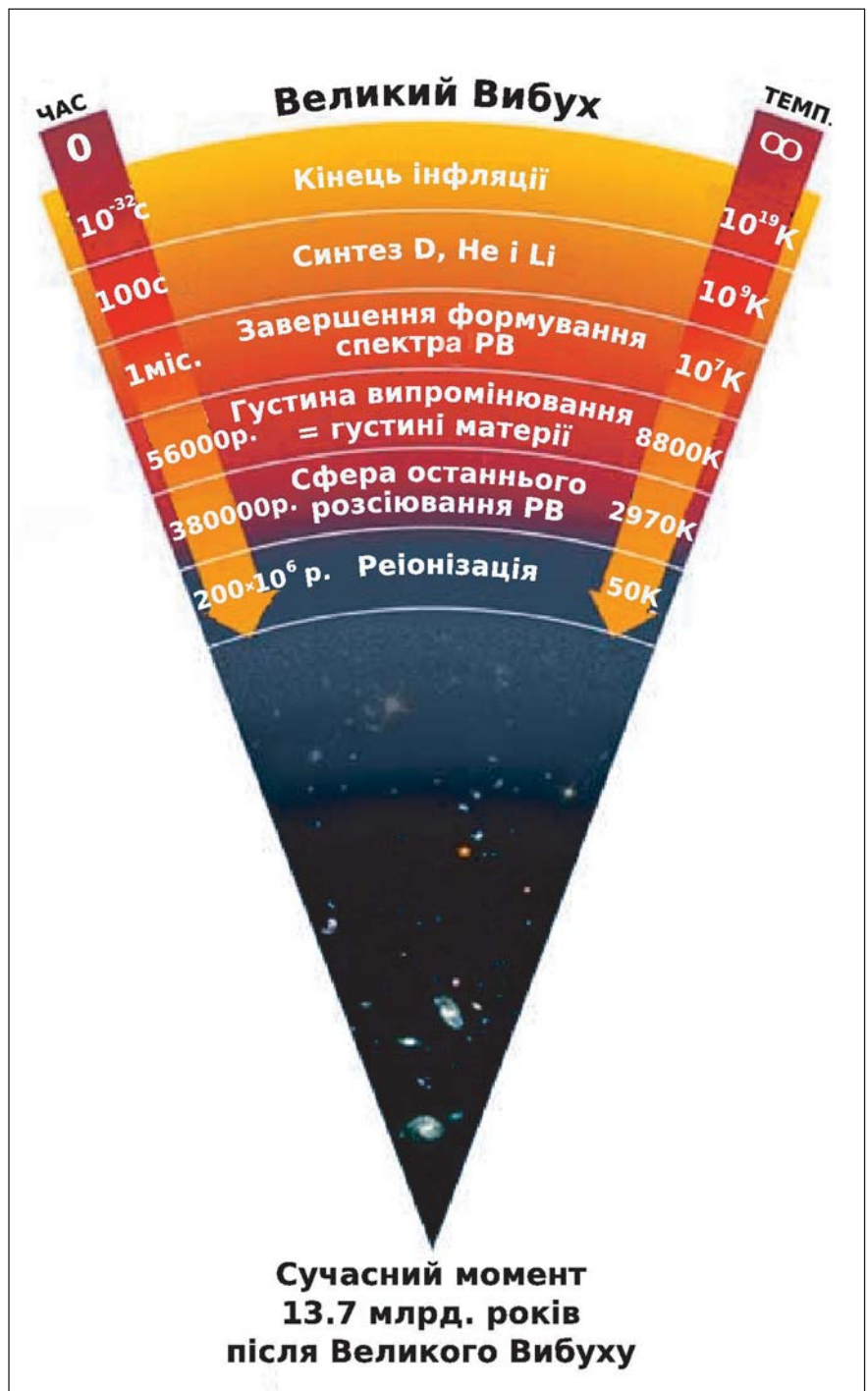
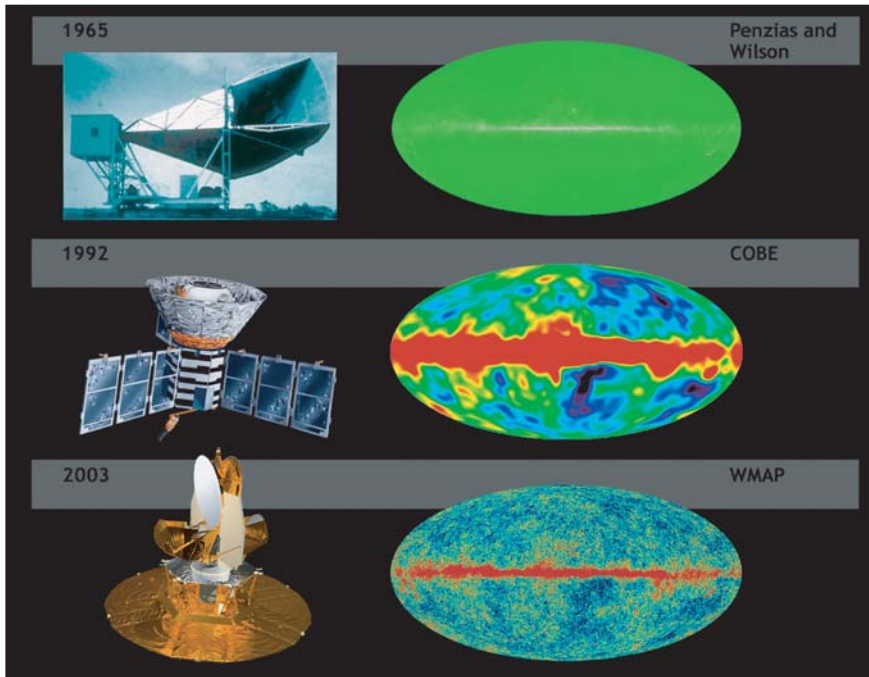


Рис. 4. Етапи еволюції Всесвіту від Великого Вибуху до сучасного моменту.  
Зліва — час, справа — температура



**Рис. 5.** Ключові експерименти в дослідженнях реліктового випромінювання. Зліва — телескопи, справа — карта небесної сфери в галактичних координатах (проекція Мульвіде). Центральна смуга на картах COBE і WMAP — Молочний шлях. Червоний колір — гарячіші плями, темно-синій — холодніші.

сила діє між різними частинами хмари у міжзоряному просторі, змушуючи її стискатися до утворення зорі. Ті в свою чергу збираються в галактики, галактики — в скупчення галактик, а ті — в надскупчення. *Євген Лівшиць*, відомий радянський фізик, ще у 1946

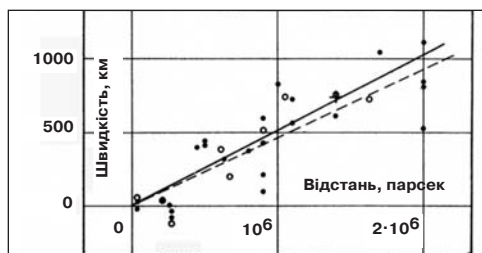
році вивів закон розвитку збурень густини і швидкості речовини у Всесвіті, який розширюється. З нього випливало, що для утворення галактик чи скупчень галактик під дією самогравітації необхідні зародкові неоднорідності відповідного масштабу, які

мали б бути згенерованими на самих початках розширення Всесвіту, а можливо і в самому Великому Вибуху. Це означає, що такі неоднорідності повинні б існувати на сфері останнього розсіювання і порушувати ізотропію реліктового випромінювання. *Р. Сакс* і *А. Вольф*, американські астрофізики, у 1967 р. першими дослідили цей ефект теоретично. Вони показали, що збурення густини і швидкості речовини, а також збурення метрики простору-часу (вважайте, гравітаційного поля) спричиняють кутові варіації температури реліктового випромінювання на рівні 0.1% на великих кутових масштабах ( $>10^\circ$ ). Фізичний механізм, який зумовлює анізотропію на цих масштабах — це зміна частоти електромагнітного випромінювання,

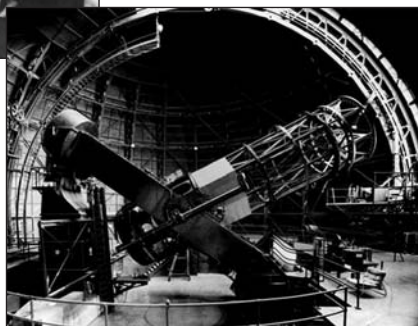
## Розширення Всесвіту



Едвін Габбл



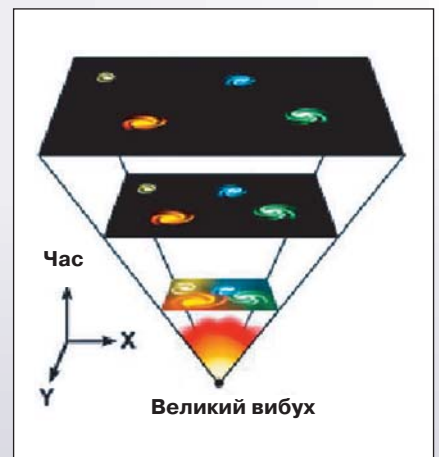
Залежність "швидкість-відстань до позагалактичних туманностей", отримана Е. Габблом



2,5-м телескоп обсерваторії Маунт Вілсон

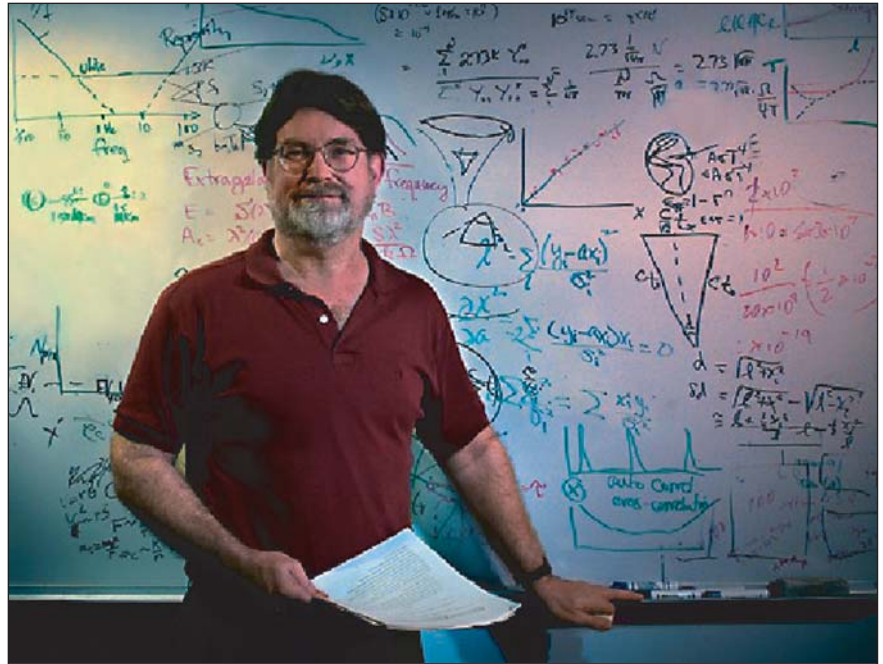
Вперше явище розширення Всесвіту було виявлене американським астрофізиком *Едвіном Габблом* у 1929 році. За допомогою найбільшого у той час телескопа з діаметром дзеркала 2.5 м (обсерваторія Маунт-Вільсон в Каліфорнії, США) він визначив відстані до найближчих галактик за допомогою знайдених у них пульсуючих зір класу цефеїд,

які є своєрідними маяками, що дозволяють визначати відстані за співвідношенням період-світимість. Зіставивши отримані відстані із їх швидкостями віддалення, визначеними *В. Слайфером* за зміщенням ліній у спектрах цих галактик, Габбл встановив, що швидкість віддалення окремої галактики *V* тим більша, чим більша



**Рис. 6. Джордж Смут (1945 р.н.), науковий керівник проекту з вимірювань анізотропії температури реліктового випромінювання COBE DMR, лауреат Нобелівської премії з фізики за 2006 р.**

зумовлена різницею гравітаційних потенціалів в точці сфери останнього розсіювання та в точці реєстрації на Землі, а також накопиченням змін гравітаційного потенціалу вздовж променя зору. У теорії анізотропії реліктового випромінювання його називають тепер ефектом Сакса-Вольфа. У наступному році Дж. Сілк з Кембриджа детально дослідив формування анізотропії на менших кутових масштабах, де основний вклад дають ефект Доплера — зміна частоти внаслідок пекулярної швидкості плазми в даній точці сфери останнього розсіювання, та адиабатичний ефект — збурення температури, пов'язані зі збуреннями густини баріонної речовини законами збереження і перенесення теплової енергії. Він показав, що збурення галактичних масштабів і більших “виживають” у гарячій плазмі, в той час як менші швидко загасають внаслідок дифузії фотонів теплового випромінювання із ділянки згущеної плазми в



більш розріджену. За його оцінками на кутових масштабах  $\sim 1^\circ$  очікувані флуктуації температури повинні бути порядку 0.2%. Ці роботи не тільки започаткували формування теорії анізотропії реліктового випромінювання — надзвичайно важливого напрямку сучасної космології, але й стимулювали

експерименти для її реєстрації. Очевидно, що такі малі відхилення можна зареєструвати тільки у надзвичайно прецизійних вимірах. Розпочалась гонитва за реєстрацією такої анізотропії в різних кутових масштабах та частотах мікрохвильового діапазону довжин хвиль. Однак, ні перший такий експе-

відстань  $r$  до неї:  $V = Hr$ . Згодом, після підтвердження цього явища іншими астрофізиками, цю закономірність назвали законом Габбла, а величину  $H$  — сталою Габбла, яка не залежить від напрямку та відстані.

Слід сказати, що це відкриття не було цілковитою несподіванкою — за сім років до цього його передбачив російський вчений *Олександр Фрідман*, застосувавши рівняння загальної теорії відносності *Єйнштейна* для опису еволюції однорідного ізотропного Всесвіту. Із розв'язків, отриманих ним, випливало, що такий Всесвіт може розширюватися або стискатися. Що робиться із нашим Всесвітом — можна встановити тільки за даними астрофізичних спостережень. Вони ж вказують на те, що він розширюється. Із закону Габбла випливає, що розширення розпочалось  $\sim 1/H$  років тому для всіх галактик одночасно. Цей момент початку розширення називають *Великим Вибухом*.

Від початку, поки за густиною домінувало випромінювання, масштаби збільшувались пропорційно  $t^{1/2}$ , а пізніше, в епоху домінування матерії, пропорційно  $t^{2/3}$ . В обох випадках, якщо розглядати стан матерії, рухаючись у часі назад, то при  $t \rightarrow 0$  (повернення до Великого Вибуху) розміри як завжди великої ділянки Всесвіту прямують до нуля, стягуються в точку. Тобто, вся матерія, яка тепер доступна для спостережень, була зібрана в кульці безмежно малих розмірів. Густина матерії і температура були безмежними в ній. Це так звана неусувна космологічна сингулярність, стан матерії в якій законами фізики не описується. Такий сценарій розширення називають *стандартною моделлю Великого Вибуху*, а сингулярність — її “неусувною” проблемою.

Але, оскільки діє закон всесвітнього тяжіння, чи інакше гравітація, то таке розширення повинно відбуватися зі сповільненням: кінетична енергія розлітання галактик витрачається на “переборювання” сил гравітації. Спроби визначити це сповільнення впродовж багатьох років були невдалими. Ситуація змінилася із виведенням у 1990 р. на навколоземну орбіту *Космічного телескопа імені Габбла* з діаметром головного дзеркала 2.4 м. Одне з головних завдань, для якого створювався цей найдорожчий у світі телескоп — дослідження далеких галактик з метою уточнення закону Габбла та визначення величини прискорення розширення Всесвіту. Результати майже десятилітніх досліджень (опубліковані у 1998 році) виявились вражаючими: замість очікуваного сповільнення розбігання галактик взаємним гравітаційним притяганням вони розбігаються із прискоренням — швидкість віддалення галактик із часом зростає! Це означає, що у Всесвіті крім звичайної речовини, для якої виконується закон всесвітнього тяжіння, є невідома фізична сутність, що має властивість гравітаційного відштовхування. За виміряним прискоренням вдалося встановити її густину: 72% від повної середньої густини Всесвіту. Тобто, вона є домінантною за середньою густиною компонентою нашого Всесвіту. Її називають *темною енергією* (детальніше про неї можна прочитати зокрема у [1-5]).

За допомогою Космічного телескопа імені Габбла та найбільших наземних телескопів визначено величину сталої Габбла:  $71 \pm 4$  км/с·Мпк. Знаючи її та вміст різних компонент, розраховано вік Всесвіту від початку розширення — він становить  $t_H = 13,7$  мільярдів років, що добре узгоджується із віком найстарших зір Галактики.

римент наприкінці 1960-х років, ні наступні у 1970-х та 1980-х роках не мали успіху. Чутливість телескопів зростала, але сигналу не було...

Наприкінці 1970-х телескопи мікрохвильового діапазону могли вже реєструвати кутові варіації температури реліктового випромінювання до 0.05%, наприкінці 1980-х — уже до 0.02%. Найдорожчим і найбільш чутливим телескопом цих років, призначеним для реєстрації кутових варіацій реліктового випромінювання, був радянський космічний телескоп “Релікт” (1983–1984 р.р.), розміщений на штучному супутнику Землі “Прогноз-9”. Він провів виміри відхилень температури від середньої, скануючи різні ділянки неба на частоті 37 ГГц з кутовою роздільною здатністю  $\sim 6^\circ$  та чутливістю 0.0006 К по температурі. За півроку було оглянуто все небо та здійснено близько 15 млн. вимірів (керівник проекту *І. Струков*). Перші результати обробки даних були опубліковані в січневому номері журналу “Письма в Астрономический журнал” за 1984 рік. Вони вказували на відсутність кутових варіацій температури 0.0002 К і більших. Грунтовніша обробка даних, опублікована у 1987 році у тому ж журналі, ще приблизно в чотири рази понизила рівень, вище якого сигналу впевнено немає. Це означало, що кутові варіації температури  $\Delta T/T$ , які пов’язані з неоднорідностями у великих масштабах, не перевищують величини

$2 \cdot 10^{-5}$ . А це вже викликало неспокій в колах теоретиків, оскільки було дуже близько до межі, перехід через яку означав заду до наукового архіву напрацьованої на цей час теорії формування структури Всесвіту. У 1989 році розпочались виміри кутових варіацій температури реліктового випромінювання високочутливим диференціальним мікрохвильовим радіометром (ДМР, аббревіатура від назви англійською мовою — DMR), другим приладом на космічній обсерваторії COBE (рис. 5). Було проскановано все небо з кутовою роздільною здатністю  $\sim 7^\circ$  на 3-х частотах 32, 53 і 90 ГГц. Це дало можливість краще врахувати і вилучити вклад випромінювання галактичних та позагалактичних джерел переднього фону. Результати обробки всіх даних були опубліковані у вересневому номері американського журналу “The Astrophysical Journal” за 1992 р. і викликали сенсацію. *Нарешті анізотропія температури зареєстрована!* Її характерна величина у масштабах, більших  $7^\circ$ , становила  $\Delta T/T = 1.1 \cdot 10^{-5}$ . Науковим керівником проекту DMR був *Джордж Смут* (рис. 6).

Автор цих рядків добре пам’ятає піднесений настрій науковців відділу теоретичної астрофізики Астрокосмічного центру ФІРАН, де у той час перебував у науковому відрядженні, та мовчазну досаду учасників проекту “Релікт”, їхніх сусідів у корпусі Інституту космічних досліджень РАН. Наст-

рій теоретиків зрозумілий — нарешті підтверджено фундаментальне передбачення теорії, яке так довго шукали. Настрій “реліктивців” теж — вони були дуже близько до цього відкриття, але не їм судилося бути його авторами. DMR на COBE був значно досконалішим, ніж “Релікт”.

*Реєстрація кутових варіацій температури реліктового випромінювання в експерименті COBE стала підтвердженням ще двох ключових ідей сучасної космології — ідеї існування темної матерії та короткочасної фази експоненціального розширення у дуже ранньому Всесвіті — інфляції.* Справді, передбачена *Саксом і Вольфом* амплітуда кутових варіацій температури реліктового випромінювання у великих масштабах  $\sim 0.1\%$  базувалась на теорії гравітаційної нестійкості Всесвіту, який розширюється і в якому є тільки баріонна речовина та випромінювання. Надійно встановлена експериментами у 1970-х роках відсутність варіацій з такою амплітудою вказувала на те, що або закони гравітації у великих масштабах не такі, або склад Всесвіту інший.

На початку 1980-х років група московських ядерників (*Ю. Любімов та ін.*) на підставі своїх експериментів заявила, що *нейтрино мають масу спокою  $\sim 30$  електрон-Вольт (eВ), що приблизно у 30 мільйонів разів менше маси спокою протона чи нейтрона, з яких складаються ядра атомів.* Але



## Проблема горизонту

Однією з найгостріших проблем стандартної моделі Великого Вибуху (див. вкладку “Розширення Всесвіту”) є проблема горизонту, яка впливає зі спостережуваних властивостей реліктового випромінювання. Суть її ось у чому. З різних частин неба на Землю надходять кванти реліктового випромінювання, енергетичний розподіл яких описується функцією Планка з середньою температурою 2.725 К. Відхилення температури від середньої від напрямку до напрямку не перевищує кількох тисячних відсотка! Така ж висока ізотропія інтенсивності реліктового випромінювання! Це означає, що в ділянках останнього розсіювання реліктового випромінювання, звідки воно надходить, з такою ж точністю однакові густина, температура, хімічний склад і все інше, що впливає на енергетичний розподіл та інтенсивність випромінювання. Тобто такі ділянки є однорідними за всіма фізичними параметрами. Отже, мали б існувати фізичні процеси, які забезпечують вирівнювання фізичних умов (теплопровідність, обмін енергіями через випромінювання, звук, дифузію та ін.). Всі процеси мають скінчену швидкість “передачі інформації” про фізичний стан різних областей простору. Вона не перевищує швидкості світла  $c = 300000$  км/с, яка є верхньою межею поширення будь-яких сигналів. Таким чином, однакові умови можуть встановитися тільки в такій ділянці, розміри якої є набагато меншими  $c \cdot t$ , де  $t$  — час, який пройшов від моменту Великого Вибуху. Сферу, яка окреслює цю ділянку, називають горизонтом частинки: це максимально віддалена поверхня, з якої за час існування Всесвіту надійшов сигнал, що поширюється зі швидкістю світла.

Реліктове випромінювання відірвалось від речовини в момент космологічної рекомбінації. Вік Всесвіту тоді становив  $t_r = 380$  тис. років. Горизонт частинки у цей

кількість нейтрино майже у мільярд разів більше за кількість протонів та електронів. Звідси випливає, що середня масова густина нейтрино значно переважає густину баріонної речовини. Оскільки нейтрино не випромінюють і не поглинають світла, то цю компоненту називають *темною матерією*. В ранню епоху, задовго до рекомбінації, нейтрино взаємодіяло з речовиною і було розігрите до високих температур. Тому таку темну матерію називають гарячою. І хоч таке значення маси нейтрино не було підтверджене іншими експериментами, ідея темної матерії у формі масивних слабковзаємодіючих частинок стала однією з ключових у сучасній космології.

Сьогодні розглядаються моделі холодної та теплої темної матерії. В них формування структури йде від об'єктів менших мас до більших шляхом ієрархічного скупчування, що узгоджується зі спостережуваними характеристиками великомасштабної структури Всесвіту. В моделі з темною матерією амплітуда варіацій температури реліктового випромінювання значно менша, ніж в чисто баріонній. Це рятувало теорію. Визначена в експерименті COBE амплітуда  $\Delta T/T$  разом із даними про галактики та їхні скупчення в сучасну епоху впевнено вказують на існування темної матерії у формі масивних слабковзаємодіючих частинок. В експерименті COBE вперше отримана карта флуктуацій темпе-

ратури реліктового випромінювання для всього неба. Її роздільна здатність була всього  $\sim 7^\circ$ , але це вже дало можливість отримати унікальну інформацію про Всесвіт, застосовуючи статистичні методи аналізу. Було побудовано двоточкову кореляційну функцію гарячих і холодних плям і отримано спектр потужності просторових неоднорідностей температури. Виявилося, що він практично збігається з тим, що передбачений інфляційними моделями раннього Всесвіту. Таким чином, це відкриття стало підтвердженням таких моделей.

Після того, як існування анізотропії реліктового випромінювання було підтверджене в десятках інших експериментів, Джорджу Смуту було присуджено Нобелівську премію з фізики за 2006 рік (розділив з Дж. Мазером). В представленні комітету було відзначено, що “результати обсерваторії COBE є відповідною точкою космології як точної науки”. Ця премія вручалась на фоні наступної успішної космічної одиссеї — WMAP, яка ще триває.

### WMAP. Чи буде третя Нобелівська премія?

Проект зі створення Зонду мікрохвильової анізотропії (*Mikrowave Anisotropy Probe, MAP*) стартував на наступний день після офіційного завершення проекту COBE — 1 листопада 1996 р. і є його логічним продовжен-

ням. Це спільний проект НАСА і Принстонського університету, його керівником став *Чарльз Беннет*, учасник проекту COBE. Призначення зонду — отримати карту флуктуацій температури реліктового випромінювання всього неба з кутовою роздільною здатністю в 33 рази кращою ( $\sim 15'$ ) та чутливістю по відношенню сигнал/шум у 45 разів більшою, ніж у COBE DMR. Це досягалось шляхом сканування всього неба уже на 5 частотах (23, 33, 41, 61 та 94 ГГц), використаням диференціальних високочутливих радіометрів як приймачів та розташуванням телескопа в точці Лагранжа L2 (див. рис. 7), що міститься на відстані 1.5 млн. км — далеко від Землі та Місяця. Запущений 30 червня 2001 року ракетносієм Дельта з мису Канаверал, MAP досягнув точки Лагранжа L2 1 жовтня 2001 року і відразу ж розпочав сканування неба.

Принцип отримання карти флуктуацій температури для всього неба полягав у наступному. Зонд являв собою два цілком ідентичні телескопи з еліптичними головними дзеркалами (головні осі 1.6м та 1.4м), які “дивляться” в протилежні сторони (кут між променями зору телескопів  $141^\circ$ ), та вторинними, які скеровують промені на приймачі, які визначають різницю температур мікрохвильового випромінювання. Зонд обертається довкола головної осі за 2 хв. 9 сек., яка пресекує з періодом в 1 годину довкола осі

час становив  $l_r = 2 \cdot c \cdot t_r$  (множник 2 з'явився внаслідок залежності темпу розширення від часу в епоху домінування випромінювання,  $\sim t^{1/2}$ ). Відстань від Землі до сфери останнього розсіювання  $l_H = 3 \cdot c \cdot (t_H - t_r)$  (множник 3 з'явився внаслідок залежності темпу розширення від часу в епоху домінування матерії,  $\sim t^{2/3}$ ). За час від  $t_r$  до  $t_H$  масштаб  $l_r$  зріс у  $(t_H/t_r)^{2/3} \sim 1100$  разів. Таким чином, на гіперповерхні постійного часу  $t_H$  кут, під яким земний спостерігач бачить причинно-зв'язану ділянку на сфері останнього розсіювання реліктового випромінювання, становить  $1100 \cdot l_r / L_H \cong 1^\circ$ . Таких ділянок на сфері останнього розсіювання понад 50000 тисяч. На верхньому рисунку схематично показано сферу останнього розсіювання із Землею в центрі. Горизонт частинки показано синьою цяткою на сфері.

На середньому рисунку зліва показано світлові конуси  $c \cdot (t_H - t) = (x^2 + y^2)^{1/2}$ , твірні яких окреслюють просторові ділянки  $(x, y)$ , доступні для спостережень із Землі тепер (зелений колір), та з двох точок на сфері останнього розсіювання (сині конуси) в стандартній моделі Великого Вибуху. На осі часу (вертикальна вісь) сучасному моменту відповідає червоне зміщення  $z=0$ , сфері останнього розсіювання  $z = 1100$ . Горизонти частинок — це кола в площині  $t = 0$ , окреслені конусами. Бачимо, що в стандартній моделі Великого Вибуху, світлові конуси двох точок, кутова відстань між якими більша ніж  $1^\circ$ , ніколи не перети-

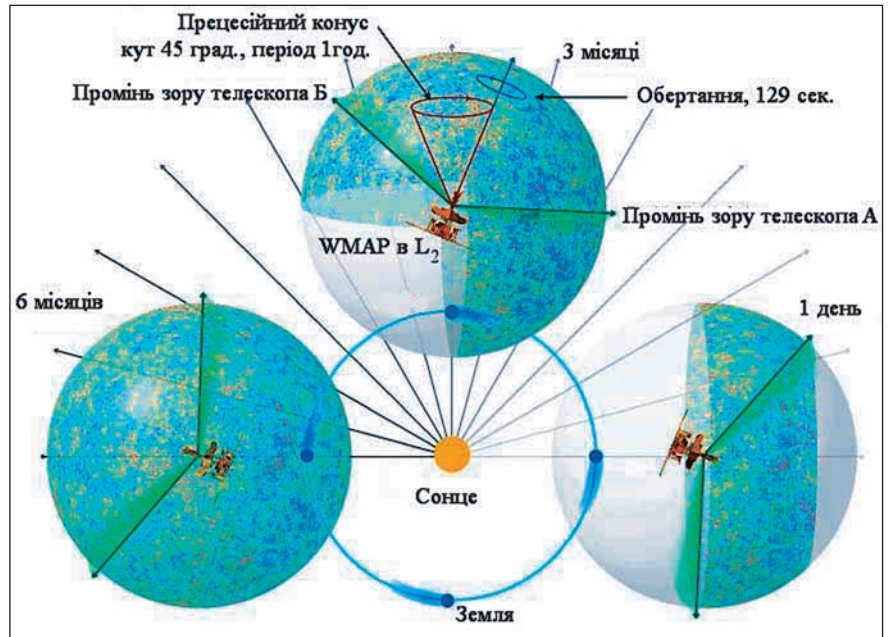
наються. Отже, за час від Великого Вибуху ( $t=0$ ) до моменту космологічної рекомбінації ( $t=t_r$ ,  $z=1100$ ) однакові усіди фізичні умови не могли бути встановлені жодними фізичними процесами, оскільки вони є поза ділянками причинно-наслідкового зв'язку. Ймовірність випадкової кореляції температури в такій великій кількості ділянок на сфері останнього розсіювання нехтовно мала.

Ця проблема усувається, якщо в дуже ранню епоху своєї еволюції (наприклад  $t \sim 10^{-25}c$ ,  $z \sim 10^{28}$ ) Всесвіт коротку мить розширювався так, що масштаби зростали  $\sim \exp(Ht)$ . Така модель Всесвіту вперше була розглянута *де Ситтером* ще у 1917 р. і називається його іменем. За таким самим законом зростають відстані між точками на поверхні сфери, яка роздувається (в англійській мові *inflate*) так, що її радіус зростає пропорційно до часу. (Так само збільшується грошова маса внаслідок інфляції). Тому таку модель ще називають *інфляційною*.

Нижній рисунок показує, що у Всесвіті з інфляційною стадією в ранню епоху світлові конуси навіть віддалених точок на сфері останнього розсіювання перетинаються, а отже спостережувана сфера останнього розсіювання реліктового випромінювання — це одна причинно-зв'язана ділянка, роздута за час тривалості інфляційної стадії до розмірів, більших за горизонт частинки.



**Рис. 7. Зонд мікрохвильової анізотропії WMAP в точці Лагранжа L<sub>2</sub> та на геліоцентричній орбіті 1 жовтня 2001 р. (справа), 1 січня 2002 р. (вгорі) та 1 квітня 2002 р. (зліва). У верхній частині показані осі обертання та прецесії супутника. За допомогою напівпрозорих сфер показано частину просканованого неба за 1 день (справа), за 3 місяці (вгорі), за 6 місяців (зліва)**



Сонце-Земля під кутом 22.5°. Ця вісь внаслідок обертання Землі довкола Сонця за добу повертається на 1° в площині екліптики. Таким чином, за півроку зонд сканує все небо 1 раз. Робоча температура радіометрів становить 90 К, яка забезпечується пасивним охолодженням в тіні сонячних батарей та теплоізоляцією від теплої частини зонда.

У 2003 році MAP було перейменовано у WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) на честь Девіда Вількінсона, одного із наукових керівників проекту, який передчасно пішов з життя у 2002 році.

Результати обробки даних одного року спостережень були опубліковані у 2003 році. Отримана карта флуктуацій температури реліктового випромінювання, яка показана на рис. 7 (нижня карта), по суті є фотографією раннього Всесвіту, в якому ще не було ні зір, ні галактик (380 тис. років після Великого Вибуху). На ній добре проглядаються гарячі і холодні плями, зумовлені зародками структури масштабу надскупчень галактик. Її можна представити в кількісних характеристиках — залежності середньоквадратичного значення амплітуди флуктуацій температури від розміру плям, або так званім спектром потужності, показаним на рис. 8, де по горизонтальній осі — розмір плями в градусах, по вертикальній — усереднений за всіма плямами даного розміру квадрат відхилення температури від середньої (мікрокельвіни в квадраті = 10<sup>-12</sup> К<sup>2</sup>). WMAP надійно встановив наявність осциляцій на кутових масштабах, менших за 2°. Вони передбачались у сценаріях формування структури із адіабатичних скалярних збурень густини і швидкості речовини та випромінювання. Теоретики розглядали й інші сценарії — формування галактик та їх скупчень з ізотермічних збурень, топологічних дефектів, текстур та ін. Кожен із них передбачав інший спектр у цій ділянці.

Отже, уже сам характер спектра чітко показав, який сценарій реалізований у нашому Всесвіті. Більше того, точність вимірів настільки висока, що дала можливість надійно встановити

положення амплітуди і вершин, і впадин, які залежать від геометрії простору-часу, вмісту і складу матерії, сталої Габбла та інших космологічних параметрів. Порівнянням теоретичного і спостережуваного спектрів вдалося встановити, що кривизна 3-простору спостережуваної ділянки Всесвіту практично дорівнює нулеві (коливання поблизу нуля у визначеннях різних авторів зумовлені похибками експериментальних даних ~2-3%), тобто, що геометрія 3-простору у великих масштабах є евклідовою. Спроби встановити її на основі астрономічних спостережень тривали фактично з часу публікації роботи Фрідмана у 1922 році. Історія визначення величини сталої Габбла теж є тривалою, вона розпочалася ще у 1929 році (див. вставку “Розширення Всесвіту”). Впродовж кількох десятків років другої половини ХХ-го століття її величина за визначеннями різних авторів потрапляла в діапазон 50-100 км/с/Мпк. Така велика невизначеність створювала проблеми для космології та астрофізики, оскільки призводила до невизначеностей інших величин у 2 рази (віку Всесвіту, наприклад). Тому ключовою задачею для Космічного телескопа імені Габбла (КТГ), виведеного на орбіту у 1990 році, було уточнення значення сталої Габбла. Задача була розв’язана: на основі дослідження *цефеїд та наднових зір в далеких галактиках встановлено значення сталої Габбла як 70±7 км/с/Мпк*. Досягнута точність визначення — 10% її величини. Це стало великим досягненням спостережної космології. Але дані WMAP разом з даними КТГ дозволили визначити її із ще більшою точністю ~5%: *71±4 км/с/Мпк*. Це дало мож-

ливість дуже точно встановити і *вік Всесвіту — 13.7±0.4 млрд. років*.

Точність, з якою визначені важливі параметри нашого Всесвіту на основі даних першого року спостережень WMAP, ще недавно вважалась неможливою, тому, на думку багатьох вчених, їх публікація відкрила епоху прецизійної космології. У 2007 році були опубліковані дані 3-х річних спостережень, а в 2009-ому — 5-ти річних, а в січні 2010-го — 7-ми річних. Вони підтвердили й уточнили попередні результати.

Принципове значення для астрофізики та фізики елементарних частинок має визначення складу Всесвіту. Амплітуди і положення піків і впадин у спектрі потужності флуктуацій температури реліктового випромінювання, який впливає з даних WMAP, надійно вказують на те, що у нашому Всесвіті баріонна речовина складає 5% від загальної середньої густини, темна матерія — 23%, а решта 72% — так звана темна енергія, на існування якої вказують дослідження наднових зір у далеких галактиках, проведені з допомогою КТГ та найбільших наземних телескопів (детальніше про неї див. статті [1-7]). Це визначення складу Всесвіту (рис. 9) сьогодні є найточнішим і найнадійнішим. І хоч природа прихованих компонент — темної матерії та темної енергії, які домінують за середньою густиною — поки-що невідома, факт встановлення їх існування та визначення їх густин має безсумнівно фундаментальне значення для фізики, астрофізики та космології.

Отримані експериментальні дані про температуру, енергетичний розподіл та анізотропію реліктового випромінювання дають можливість будувати теоретичні моделі дуже раннього

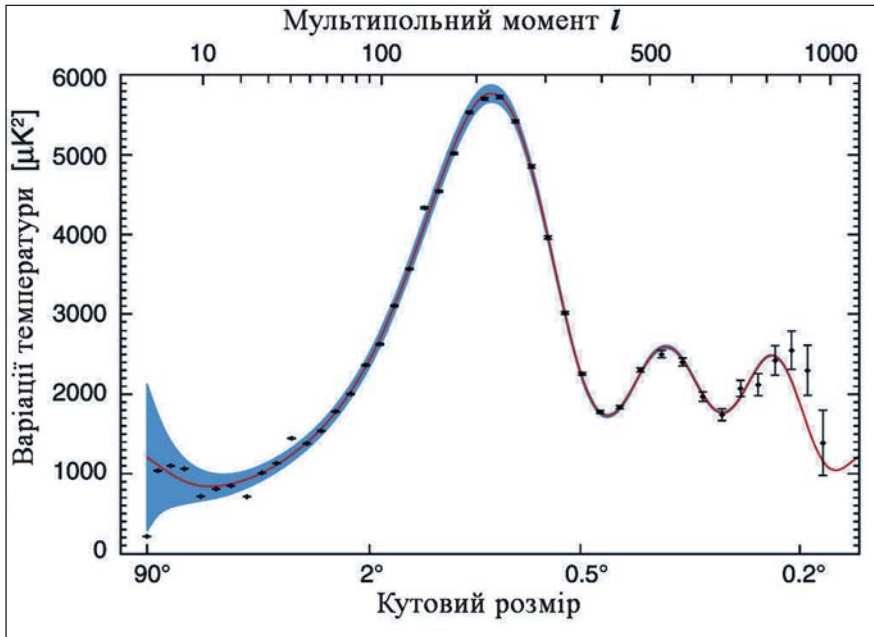


Рис. 8. Спектр потужності флуктуацій температури реліктового випромінювання: залежність середньо-квадратичного значення амплітуди флуктуацій температури від розміру плям. Горизонтальна вісь — розмір плями в градусах  $^{\circ}$ , вертикальна — усереднений за всіма плямами даного розміру квадрат відхилення температури від середньої (мікрокельвіни в квадраті =  $10^{-12}$  К $^2$ ). Верхня горизонтальна вісь проградуєвана у номерах сферичних гармонік  $l \approx 180^{\circ}/\theta$ .

Всесвіту, коли елементарні частинки та фотони мали енергії значно більші за ті, яких досягнуто у найпотужніших прискорювачах елементарних частинок. Таким чином, відкриття і дослідження реліктового випромінювання стало мостом, що з'єднав два береги науки про світ, в якому ми живемо — космологію, науку про Всесвіт як ціле (найбільші масштаби), та фізику елементарних частинок і високих енергій, яка вивчає фундаментальні властивості матерії у найменших масштабах.

### WMAP передає естафету Планку

WMAP уже 9-й рік вимірює анізотропію реліктового випромінювання й у вересні 2010 року завершить свою місію, одну з найуспішніших і найпродуктивніших. Свідченням цього є те, що публікації даних WMAP займають три перші місця у списку найбільш цитованих праць із фізики й астрономії XXI-го століття. Проте уже цього року чи в наступні 2-3 роки можуть з'явитися нові лідери за кількістю цитувань. Ними можуть стати або публікації результатів досліджень, отриманих на Великому адронному колайдері, або ж на космічній обсерваторії Планк, яка розпочала сканування неба в мікрохвильовому діапазоні електромагнітного випромінювання 27 серпня 2009 року. Ця обсерваторія, як і WMAP, міститься поблизу точки Лагранжа L2 (див. вставку "Космічна обсерваторія Планк"), але значно досконаліша — виміри проводяться на дев'яти частотах в діапазоні 30-857 ГГц, приймачі охолоджені до найнижчої, досягнутої сьогодні, температури

0.1 К, чутливість до температури в 5 разів вища, просторова роздільна здатність у 3 рази краща, ніж у WMAP. За його допомогою вчені сподіваються визначити спектр потужності флуктуацій температури реліктового випромінювання до сферичних гармонік  $\sim 3000$  (див. верхню шкалу на рис. 8) з точністю по амплітуді  $\sim 1\%$ , визначити параметри Стокса поляризації реліктового випромінювання, встановити положення й амплітуду третього та наступних акустичних піків. Це дасть змогу точніше визначити космологічні параметри, характеристики первісного (післяінфляційного) спектра збурень, вміст баріонної і темної матерії та інші фундаментальні параметри нашого Всесвіту. Але головне, на що сподіваються дослідники, — це виявлення "відбитків пальців" реліктових гравітаційних хвиль, згенерованих в інфляційну епоху. Дані WMAP про спектр потужності флуктуацій температури реліктового випромінювання дали можливість отримати тільки верхню межу на вклад у цей спектр реліктових гравітаційних хвиль. Останні зумовлюють рухи плазми на сфері останнього розсіювання, а ті у свою чергу, через ефект Доплера флуктуації температури. Однак, відрізнити їх від флуктуацій, зумовлених збуреннями швидкості, що пов'язані зі збуреннями густини речовини, практично неможливо. Отже, треба шукати інші ефекти впливу реліктових гравітаційних хвиль на реліктове електромагнітне випромінювання, за якими можна буде встановити їх існування.

Вчені проаналізували їхній вплив на поляризацію реліктового електромагнітного випромінювання і таки знайшли особливість, за якою їх мож-

на ідентифікувати. Рухи плазми на сфері останнього розсіювання реліктового випромінювання, незалежно від природи їх генерації, зумовляють слабку лінійну поляризацію реліктового випромінювання. Розрізнити вклади від гравітаційних хвиль та збурень густини в ступінь і напрям поляризації у кожній точці небесної сфери неможливо. Але якщо розглядати їхню просторову структуру, тобто орієнтацію поляризації в різних точках площини небесної сфери, то тут з'являється різниця. Збурення густини в первинній плазмі зумовлюють утворення колоподібних і радіальних структур поляризації, в той час як гравітаційні хвилі — ліво- і правобічні закрути (рис 10). Таким чином, провівши "дактилоскопічний" аналіз карти поляризації реліктового випромінювання, можна буде встановити присутність реліктових гравітаційних хвиль та виміряти їх потужність.

Чутливість космічної обсерваторії Планк до температури і поляризації уже достатня, щоб ставити таку задачу. Виявити таким чином реліктове гравітаційне випромінювання — це дуже амбітна мета, але команда Планка — від науковців до інженерів — зробили і роблять все, щоб її досягнути. Чому амбітна? Річ у тім, що реліктові гравітаційні хвилі почали вільно поширюватися відразу після завершення інфляційної стадії, тобто, коли вік Всесвіту не перевищував однієї десятимільярдної частки секунди! Це релікт із дуже ранньої епохи, коли енергії частинок були значно більшими за величину 1000 TeV (нагадаю, що у Великому адронному колайдері частинки будуть розіганані до максимальних енергій 14 Тераелектрон-вольт, а префікс Тера означає тисячу мільярдів —  $10^{12}$ ).

Виявлення "відбитків пальців" цього випромінювання в структурі поляризації реліктового випромінювання стане незаперечним доказом — існування гравітаційних хвиль, — існування інфляційної стадії,

— квантових флуктуацій метрики простору-часу в цю епоху.

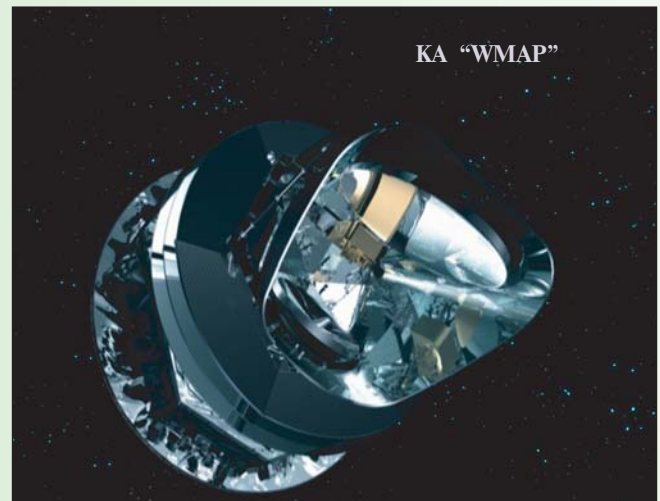
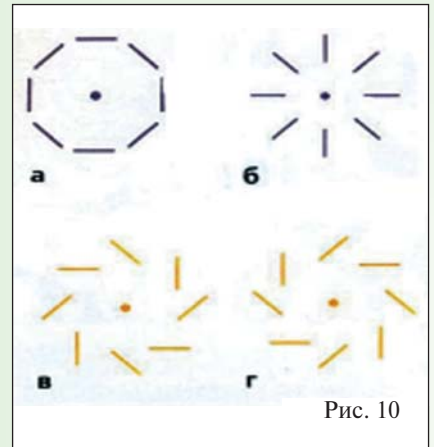
Потужність сигналу завиткової поляризації залежить від потужності реліктового гравітаційного випромінювання, яка визначається шкалою енергій інфляційної стадії. Чим раніше, відбулась інфляція, тим більший масштаб енергій. Зі згаданих обмежень, отриманих на основі даних COBE і WMAP, випливає, що це сталося не раніше  $10^{-38}$  частки секунди (!) після Великого Вибуху. Енергія частинок сягала тоді  $10^{12}$ - $10^{13}$  ТеВ. Вчені очікують, що інфляція відбулась, коли сильна взаємодія, відповідальна за існування ядер атомів, відділялася від Єдиної взаємодії, яка описується Теорією Великого Об'єднання. Це сталося, коли частинки мали енергію  $\sim 10^{11}$  ТеВ, а після Великого Вибуху минуло всього  $10^{-35}$  секунди. Якщо інфляція відбулася саме у ту мить, то згенеровані тоді гравітаційні хвилі повинні залишити свої “відбитки пальців” на сфері останнього розсіювання реліктового електромагнітного випромінювання (380 тис. років після Великого Вибуху) у вигляді завиткової структури його поляризації, яку космічна обсерваторія Планк здатна зареєструвати. Якщо ж вона мала місце значно пізніше, скажімо  $10^{-25}$  секунди після Великого Вибуху, то сигнал буде нижчим рівня детектування. Але й це дасть науковцям інформацію для роздумів: а який тоді фізичний процес запустив інфляцію?

Отже, космічна обсерваторія Планк, хоч і опосередковано, та все ж “підгляне”, як творився наш Всесвіт, а обговорення її результатів стимулюватиме подальші дослідження у цьому напрямку.



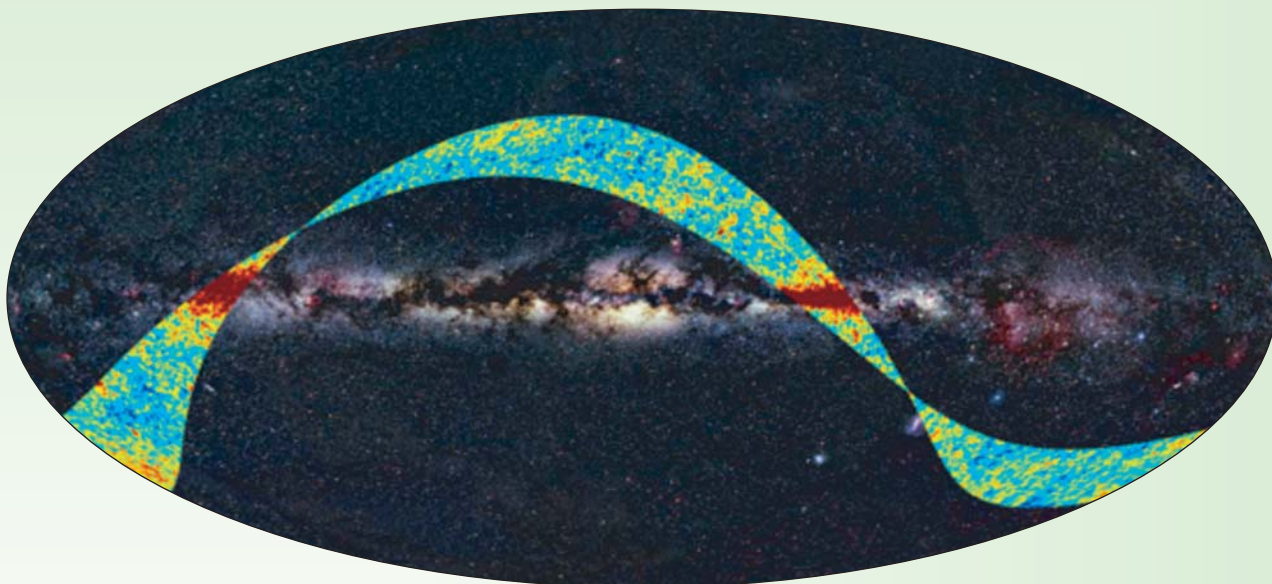
Рис. 9. Вміст речовини у Всесвіті за даними КА WMAP: баріонна речовина — 5%, темна матерія — 23%, темна енергія — 72%.

Рис. 10. Характерна просторова структура поляризації реліктового електромагнітного випромінювання: збурення густини та швидкості речовини зумовлюють колоподібну (а) та радіальну структуру (б), реліктові гравітаційні хвилі — ліво-(в) та правобічні закрути (г).



#### Література

1. Насельский П.Д., Новиков Д.И., Новиков Д.И. Реликтовое излучение Вселенной. — М.: Наука, 2003. — 390 с.
2. Durrer R. The cosmic microwave background. — Cambridge: Cambridge University Press, 2008. — 401 p.
3. Яцків Я.С., Александров О.М., Вавілова І.Б., Жданов В.І., Кудря Ю.М., Парновський С.Л., Федорова О.В., Хміль С.В. Загальна теорія відносності: випробування часом. — Київ: ГАО НАН України, 2005. — 288 с.
4. Величний космос. — Спеціальний випуск журналу “Світ науки”, №2(8), 2001.
5. Новосядлий Б.С. Основи і становлення сучасної космології // Педагогічна думка. — 2004.—№2.— с.3-12.
6. Сажин М., Сажин О. Прискорене розширення і “темна енергія” Всесвіту // Світогляд. — 2007.— №3(5). — с.40-49.
7. Новосядлий Б.С. Темна енергія — загадка століття // Світ фізики. — 2007. — №4. — с. 3-9.



## Космічна обсерваторія Planck

Космічна обсерваторія “Planck” призначена для отримання карти температури і поляризації реліктового випромінювання всього неба з безпрецедентною чутливістю ( $\Delta T/T \sim 2 \cdot 10^{-6}$ ) та кутовою роздільною здатністю ( $\sim 5$  дугових хвилин). Це — штучний супутник, на борту якого містяться телескоп для мікрохвильового діапазону довжин хвиль, блок наукової апаратури, телекомунікації, система енергозабезпечення та контролю орієнтації в просторі. Запущений 14 травня 2009 року з космодрому Куру (Французька Гвіана) ракетою-носієм “Аріан-5”. У липні досягнув точки Лагранжа  $L_2$ , звідки проводитиме спостереження впродовж 15 місяців. Вона знаходиться на відстані 1.5 млн км від Землі з протилежного від Сонця боку. Супутник описуватиме відносно цієї точки фігури ліссажу з амплітудою  $\sim 400\,000$  км (орбіта показана на нижньому рисунку). Загальна вага супутника — 1.9 т, габарити — циліндрична форма з максимальним діаметром 4.2 м в основі та висотою 4.2 м.

Оптичну систему телескопа становлять два позаосьові еліптичні дзеркала: первинне з розмірами  $1.9\text{ м} \times 1.6\text{ м}$  (на середньому рисунку у правій верхній частині труби телескопа) та вторинне  $1.1\text{ м} \times 1.05\text{ м}$  (на рисунку у лівій нижній частині труби телескопа). Ефективна апертура — 1.5 м, фокусна відстань — 1.4 м, робоче поле зору —  $15^\circ$ . Дзеркала розташовані так, що промінь зору телескопа утворює кут  $85^\circ$  до основної осі супутника, довкола якої він обертається з частотою 1 оберт за хвилину.

Приймальна апаратура реєструє електро-магнітне випромінювання у вузьких смугах на 9 частотах: 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545 та 857 ГГц. Приймачами на найнижчих 3-х частотах є транзистори з високою рухливістю елект-

ронів НЕМТ, охолоджені до 20 К ( $-253^\circ\text{C}$ ), на вищих частотах — болометри, охолоджені до 0.1 К ( $-273.05^\circ\text{C}$ ). Сьогодні це найхолодніше місце у Сонячній системі! Це забезпечується унікальною системою пасивного охолодження в космічних умовах (до 50 К) та 3-ступеневою охолоджувальною системою рідким гелієм до 0.1 К. Завдяки цьому досягнуто найбільшої чутливості у визначенні температури. Крім вимірювання температури реліктового випромінювання в кожній ділянці неба, апаратура визначатиме також і параметри Стокса його поляризації.

Процес вимірювань є таким. Супутник здійснює повний оберт довкола власної осі, яка завжди паралельна осі Сонце-Земля-телескоп. Борт супутника з боку Сонця — це сонячна батарея і екран телескопа одночасно. Таким чином, сонячна батарея весь час повернута до Сонця, а телескоп перебуває в її тіні. Вісь променя зору телескопа внаслідок обертання супутника довкола власної осі описує конус на небі, з кутом при вершині  $85^\circ$  в протилежному від Сонця напрямі. Таким чином за один оберт супутника одночасно на всіх робочих частотах сканується кільце на небесній сфері шириною  $15^\circ$ . За добу напрям осі обертання зміщається на  $1^\circ$  в площині геліоцентричної орбіти супутника, оскільки довкола Сонця він обертається синхронно із Землею. Таким чином за півпроку буде отримана карта всього неба. На рисунку зліва наведено результати пробного сканування неба в період з 13 по 27 серпня 2009 р. (проекція небесної сфери на площину в галактичних координатах). Результати тестування засвідчили, що всі системи космічної обсерваторії працюють нормально, і з 27 серпня вона розпочала неперервне сканування неба.

Космічна обсерваторія Planck створена Європейським Космічним Агенством, її загальна вартість складає приблизно 700 млн євро.