

КОСМІЧНА ОБСЕРВАТОРІЯ “PLANCK”: МІСІЯ ЗАВЕРШЕНА, РЕЗУЛЬТАТИ ВРАЖАЮЧІ



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

Учення про існування та властивості реліктового випромінювання Всесвіту є наріжним каменем у будівлі сучасної наукової картини світу. Важливість відкриття реліктового випромінювання в 1965 році підтверджена нагородою його авторів *Арно Пензіаса* і *Роберта Вільсона* Нобелівською премією з фізики 1978 року та величезною кількістю експериментів, призначених для вивчення його енергетичного спектру, просторової анізотропії та поляризації.

У 1992 році, 25 років тому, були опубліковані результати космічної місії COBE (Cosmic Background Explorer), які теж стали науковим “бестселером” та здобули керівникам проекту Нобелівську премію з фізики за 2006 рік — за відкриття анізотропії та визначення енергетичного розподілу космічного фонового випромінювання. Наступна космічна місія — WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) — була не менш успішною. Її результати стали початком нової епохи в космології — *прецизійної космології* — і заслуговують найвищого схвалення. Про історію відкриття реліктового випромінювання та експерименти COBE і WMAP журнал “Світогляд” писав раніше¹. В останні роки у розмовах чи статтях про реліктове випромінювання не можна обійти результати, отримані Космічною обсерваторією “Planck”, — найвищі досягнення сучасної спостережної космології. Вони представлені в окремому 594-у томі журналу “Astronomy and Astrophysics” за 2016 рік 28 статтями із загальним підзаголовком “Planck 2015 results”². Тут ми зробимо стислий огляд цих результатів у формі, доступній всім, хто цікавиться досягненнями сучасної науки, їхніми історіями та творцями.

Передбачення і відкриття

У 1948 *Георгій Гамов*, намагаючись пояснити виникнення хімічних елементів у процесі Великого вибуху, дійшов висновку, що ранній Всесвіт мав бути гарячим, а наслідком фізичних процесів у ту епоху повинно бути реліктове теплове випромінювання, яке заповнює Всесвіт у нашу епоху. Його пряме детектування було зроблено “випадково” *Арно Пензіасом* і *Робертом Вільсоном* весною 1964 року і було сприйнято ними як “шум”, який потребував вивчення й усунення. Після безрезультатної боротьби з цим “шумом” впродовж року і консультацій з групою *Роберта Дікке* з Принстонського університету в 1965 році йому було “даровано життя” як релік-

¹ “Світогляд”, № 1(21), 2010.

² У бібліотеці електронних препринтів вільного доступу *arXiv.org* вони представлені в 2015 році.

Коротка історія досліджень

Це відкриття підтвердило теорію Великого вибуху, гіпотезу гарячої моделі раннього Всесвіту і стало переломним етапом становлення космології як у теоретичному, так і в спостережному напрямках. Найбільш інтенсивно почали розвиватися дослідження самого реліктового випромінювання, його енергетичного спектра, температури, просторової ізотропії, поляризації.

Відразу після його відкриття, в роботах *Р. Сакса* і *А. Вольфа* (1966), *Дж. Сілка* (1967), *М. Ріса* та *Д. Шами* (1968), *Р. Сюняєва* та *Я. Зельдовича* (1969) були закладені основи теорії анізотропії реліктового випромінювання, обумовленої ефектами, які були названі іменами їх першовідкривачів. Найнижча гармоніка в розкладі залежності температури реліктового випромінювання від небесних координат за сферичними функціями (диполь) пов'язана з рухом Сонячної системи відносно системи відліку, в якій реліктове випромінювання є ізотропне. Швидкість цього руху виміряна вперше ще наприкінці 1960-х років. Сучасне значення швидкості цього руху у напрямі сузір'я Лева отримано за допомогою космічного телескопа WMAP і дорівнює $369 \pm 0,3$ км/с. Рух з такою швидкістю спричиняє різницю температури випромінювання у напрямі руху і в перпендикулярному до нього напрямі лише $\Delta T = 0,003356 \pm 0,000008$ К (середнє зображення на рис.1).

Суть експерименту полягала у вимірюванні таких різниць температури. Позитивних реєстрацій величин наступних гармонік — квадруполя, октополя і т. д. — прийшлося чекати більше двадцяти років. Всупереч очікуванням, амплітуди цих гармонік виявилися у сотні разів меншими від амплітуди диполя.

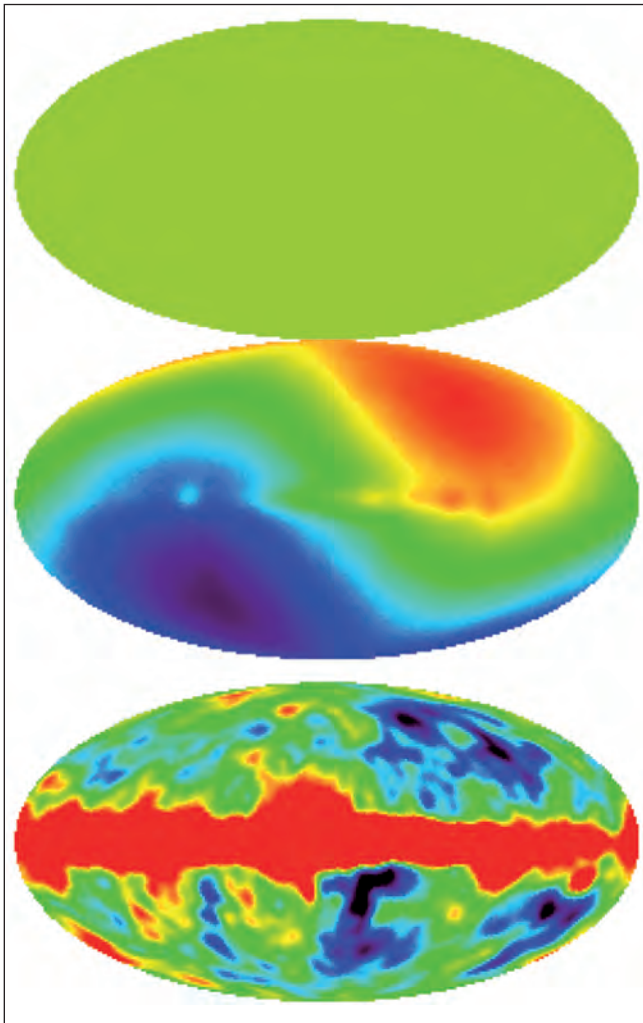


Рис. 1. Проекція Мульвайде небесної сфери в галактичних координатах температури реліктового випромінювання за результатами вимірювань COBE.

Верхній рисунок — монопольна або ізотропна складова, середній — дипольна складова, зв'язана з рухом Сонця відносно реліктового випромінювання, нижній — анізотропія, обумовлена великомасштабною структурою Всесвіту. Червона смуга на нижній карті — Молочний (Чумацький) шлях, який екранує реліктове випромінювання

товому випромінюванню, передбаченому Гамовим. Світ дізнався про це з двох коротких статей у журналі "Astrophysical Journal", які вийшли влітку 1965 року. Не можна не згадати, що ще весною 1964 року *Георг Новіков* і *Андрій Дорошкевич* написали статтю для журналу "Доклады АН СССР", у якій детально описали, в якій частотній області і яким інструментом потрібно шукати це випромінювання. Восени та стаття була надрукована в англійському виданні того ж журналу, але, на жаль, залишилася непоміченою ні Пензіасом, ні Вільсоном, хоча вона явно випереджала їхнє відкриття. Але це й не дивно — вони не були космологами, а проблема, яку вони намагалися розв'язати у той час, була пов'язана з ближнім космосом і радіовипромінюванням Галактики. Проте в своїх лекціях з нагоди вручення їм Нобелівської премії у 1978 році за відкриття реліктового випромінювання вони таки згадали про тих, хто першими вказали на те, як і яким приладом його можна зареєструвати.

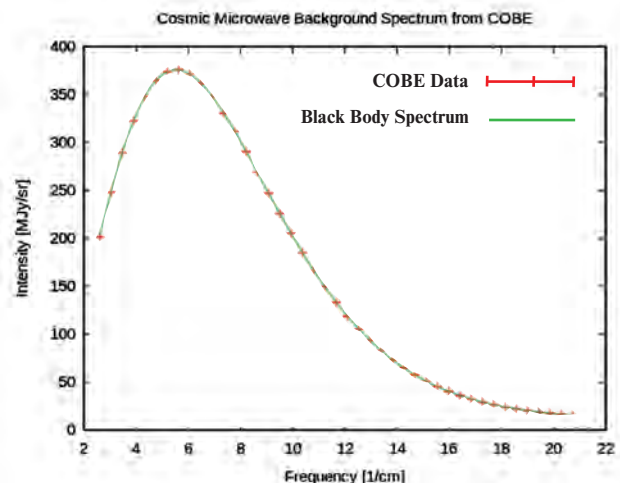


Рис. 2. Спектр реліктового випромінювання (залежність інтенсивності від довжини хвилі), отриманий за допомогою COBE у 1990 році (хрестики) і теоретична крива Планка з температурою 2.725 градусів Кельвіна (сіра лінія). Відсутність будь-яких відхилень від теплового спектра виключає існування нетеплових джерел енергії у ранньому Всесвіті — первинних чорних дір, екзотичних частинок, що розпадаються, полів та ін.

Це пояснюється тим, що ці складові анізотропії зумовлені зовсім іншими фізичними причинами, а саме — початковими флуктуаціями метрики *простору-часу*, а також флуктуаціями густини і швидкості речовини, з якої формується спостережувана структура Всесвіту — галактики, їхні скупчення, порожнечі, надскупчення, стінки, волокна... Вперше такі флуктуації температури реліктового випромінювання були зареєстровані космічним телескопом COBE у 1992 році за допомогою спеціального приладу DMR (Differential Microwave Radiometer): $\Delta T = 0,00003 \pm 0,000002$ К (нижнє зображення на рис. 1). Керівник проекту *Джордж Смут (George Smoot)* за це відкриття був удостоєний Нобелівської премії за 2006 рік. Інший прилад, установлений на тому ж супутнику, вивчав спектр реліктового випромінювання. Отриманий результат приголомшив точністю відповідності вимірної залежності інтенсивності випромінювання від довжини хвилі теоретичній планковій кривій для абсолютно чорного тіла (рис. 2) з температурою 2,725 К. Науковий керівник цього проекту *Джон Мазер (John Mather)* також отримав Нобелівську премію 2006 року, що свідчить про велике значення результату цього дослідження для побудови наукової картини світу.

Деякі роками раніше, в 1983 році, вперше було зареєстровано ефект Сюняєва—Зельдовича — розсіювання квантів реліктового випромінювання на гарячих (рентгенівських) електронах скупчень галактик, що дозволяє вимірювати кутові розміри скупчень, які знаходяться на різних відстанях від Землі. Це один з дуже важливих космологічних тестів. У 1993 році були отримані перші зображення скупчень галактик у сигналі від цього ефекту.

У 2005 році почалися систематичні спостереження скупчень галактик за допомогою радіотелескопів, що працюють на принципі побудови карт величини параметра Комптона, отриманого на основі вимірювання ефекту Сюняєва—Зельдовича: Arcminute Microkelvin Imager (AMI) неподалік від Кембриджа (Англія) і Sunyaev-Zel'dovich Array (SZA) в горах Північної Америки. На зображенні (рис. 3), взятому з сайту SZA (<http://astro.uchicago.edu/sza/overview.html>), показано три скупчення галактик, які знаходяться на різних червоних зміщеннях ($z = 0,17, 0,54$ і $0,83$), у параметрі ефекту Сюняєва—Зельдовича і в рентгенівському промінні на картах-врізках. Видно, що при збільшенні відстані (червоного зміщення) рентгенівський сигнал слабше обернено пропорційно квадрату відстані, в той час як сигнал ефекту Сюняєва—Зельдовича не залежить від відстані до об'єкта.

Наприкінці 90-х років XX ст. завдяки низці наземних (Saskatoon, TOCO) і стратосферних (QMAP,

BOOMERanG, MAXIMA) експериментів з вивчення реліктового випромінювання було зроблено дуже важливе відкриття — у спектрі потужності флуктуацій температури реліктового випромінювання (пояснення наводиться нижче) виявлено пік на кутових масштабах $\sim 1^\circ$ з амплітудою $\sim 0,00008$ К. Його положення й амплітуда вказують на дві важливі властивості нашого Всесвіту: 1) геометрія 3-вимірного простору Всесвіту дуже близька до евклідової (тобто глобальна кривина простору дорівнює нулю або дуже близька до нього) і 2) спостережувана структура Всесвіту утворилася з адіабатичних збурень густини і швидкості матерії, згенерованих у ранню епоху її еволюції. Це суттєво зменшило кількість космологічних моделей нашого світу і сценаріїв утворення його структури, які узгоджуються з сукупністю спостережених даних.

Початок нового сторіччя відзначено новими успіхами спостережної космології. У 2001 році було виведено на навколосонячну орбіту в точку Лагранжа L2 космічний картограф WMAP, задачею якого було побудувати карту всього неба у флуктуаціях температури реліктового випромінювання. Публікація перших наукових результатів у 2003 році відкрила епоху прецизійної космології. Отриманий спектр потужності флуктуацій температури реліктового випромінювання містив надійно визначені положення та амплітуди перших трьох акустичних піків і впадін. Використання цих даних дозволило надійно визначити склад Всесвіту (5 % — баріонна речовина, 25 % — темна матерія, 70 % — темна енергія) і значення ще шести важливих космологічних параметрів. Журнал “Світогляд” уже знайомив своїх читачів з цим експериментом³.

Ще одним важливим для космології напрямом виявилось дослідження поляризації реліктового випромінювання. Теплові кванти розсіюються на вільних електронах, які беруть участь у колективних рухах плазми, пов'язаних з первинними флуктуаціями густини і швидкості речовини. Таке розсіювання приводить до того, що в різних ділянках неба випромінювання, яке ми реєструємо, має різну поляризацію⁴. Ступінь поляризації мізерна, але сучасними приладами міряється надійно. Оскільки електромагнітна хвиля є поперечною — вектори електричного і магнітного поля коливаються в площині, перпендикулярній до напрямку поширення, — то накладені на карту неба напрямки поляризації будуть утворювати візерунки, які докола будь-якої точки можна представити радіальними і тангенційними відрізками. Це так звана *E*-мода (тип) поляризації. Є ще одна мода поляризації — вихрова, або *B*-мода, яка зумовлена деформацією простору гравітаційними хвилями в

³ “Світогляд”, № 1(21), 2010.

⁴ Поляризація електромагнітної хвилі — це просторова орієнтація вектора напруженості електричної складової електромагнітної хвилі. Стан поляризації описується напрямком та ступенем, який обчислюють як відношення інтенсивності поляризованої складової пучка випромінювання і неполяризованої.

⁵ Космічна обсерваторія “Planck”, створена Європейським Космічним Агентством. Її загальна вартість — 700 млн євро.

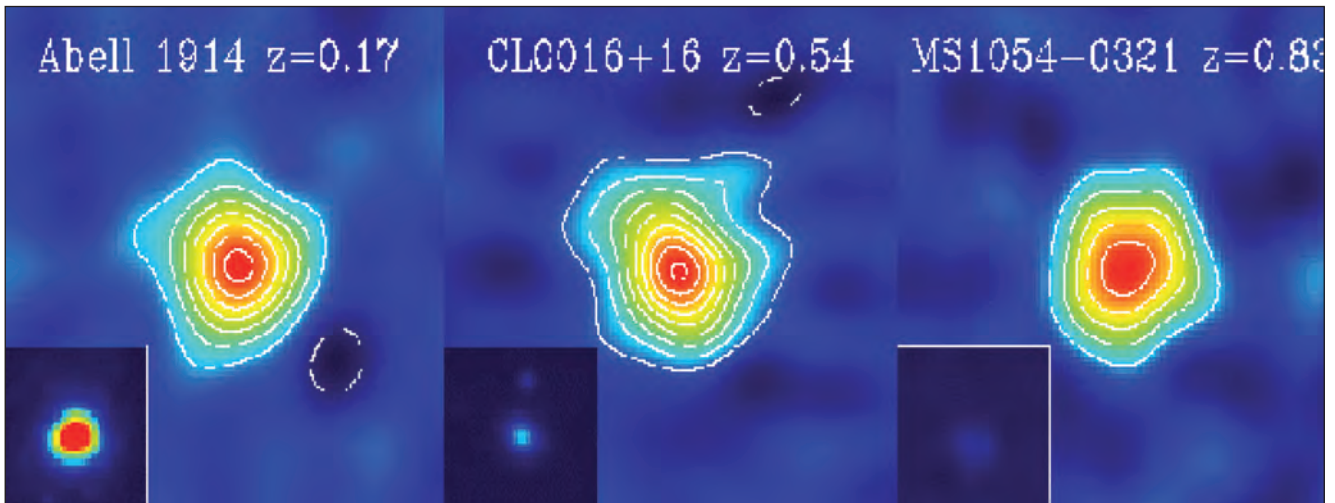


Рис. 3. Зображення трьох скупчень галактик, які знаходяться на різних червоних зміщеннях z , у величинах параметра Комптона, який вимірюється на основі ефекту Сюняєва—Зельдовича. Зліва внизу кожного зображення у параметрі ефекту Сюняєва—Зельдовича показано зображення того ж самого скупчення у рентгенівському промінні

області розсіювання та гравітаційними лінзами на шляху до спостерігача. Така поляризація зумовлює візерунки у формі завитків чи вихорів. Розкладаючи потік реліктового випромінювання від кожного клаптика неба на дві моди (або типи) поляризації — E -моду (радіальні й тангенційні відносно довільної точки) і B -моду (вихрова складова напрямів), — можна виокремити внесок різних ефектів, знаючи з теорії, в якому кутовому масштабі на небі той чи інший ефект дає внесок у ту чи іншу моду.

Перші результативні вимірювання E -моди поляризації були проведені в 2002 році за допомогою телескопа DASI (Degree Angular Scale Interferometer), що знаходиться на Південному полюсі Землі. B -мода поляризації, зумовлена гравітаційним лінзуванням неоднорідностями на промені зору, вперше надійно була виміряна тільки в 2014 році телескопом POLAR-BEAR, який розташований на висоті 5200 м у гірській пустелі Атакама в Чилі. Навколо сигналу в B -моді поляризації, зумовленої первинними гравітаційними хвилями, команди телескопів BICEP2, Keck Array і Planck інтригують уже два роки. Світове наукове співтовариство перебуває в очікуванні дуже важливих новин від них.

Резюмуючи коротку історію досліджень реліктового випромінювання, можна сказати, що з часу відкриття для його вивчення побудовано більше півсотні наземних, стратосферних і космічних телескопів, а теорія доведена до субпроцентної точності передбачень у доступних для спостережень діапазонах частот і кутових масштабах.

Вершиною експериментальних досліджень реліктового випромінювання є космічна обсерваторія (КО) “Planck”, яка зосередила в собі всі сучасні теоретичні, спостережні, технологічні та обчислювальні досягнення людської цивілізації другого десятиріччя XXI століття.

КО “Planck”: техніка експерименту

КО “Planck”⁵ призначена для отримання карти температури і поляризації реліктового випромінювання усього неба з безпрецедентною чутливістю за температурою $\Delta T \approx 0,000005$ К і кутовим розділенням ~ 5 кут. хв. Це штучний супутник, на борту якого знаходиться телескоп мікрохвильового діапазону довжин хвиль, блок наукової апаратури, телекомунікації, система енергозабезпечення і контролю положення в просторі. Він запущений 14 травня 2009 року з космодрому Куру (Французька Гвіана) ракетоносієм “Аріан-5”. У липні КО “Planck” досягнув точки Лагранжа L2, звідки 29,5 місяців проводив вимірювання інтенсивності випромінювання з кожного клаптика неба розміром ~ 5 кут. хв на дев’яти частотах електромагнітного спектра. Супутник окреслював відносно точки L2 фігури Ліссажу (див. рис. 4) з амплітудою $\sim 400\,000$ км, тобто радіусом порядку радіуса орбіти Місяця.

Загальна вага супутника 1,9 т, габарити — циліндрична форма з максимальним діаметром 4,2 м в основі та висотою 4,2 м (рис. 5). До оптичної системи телескопа входять два еліптичних дзеркала, розміщені поза віссю: первинне — розміром 1,9 x 1,6 м і вторинне — 1,1 x 1,05 м. Ефективна апертура — 1,5 м, фокусна відстань — 1,4 м, робоче поле зору — 15° . Дзеркала розміщені так, що промінь зору телескопа утворює кут 85° з основною віссю супутника, навколо якого він обертається з частотою 1 об./хв. Приймальна апаратура реєструвала електромагнітне випромінювання у вузьких смугах на дев’яти частотах: 30, 44, 70, 100, 143, 217, 353, 545 та 857 ГГц. Приймачами на трьох низьких частотах були транзистори з високою мобільністю електронів HEMT (High-Electron-Mobility Transistor), охолоджені до температури 20 К (-253°C), на вищих частотах — болометри, охолоджені до 0,1 К

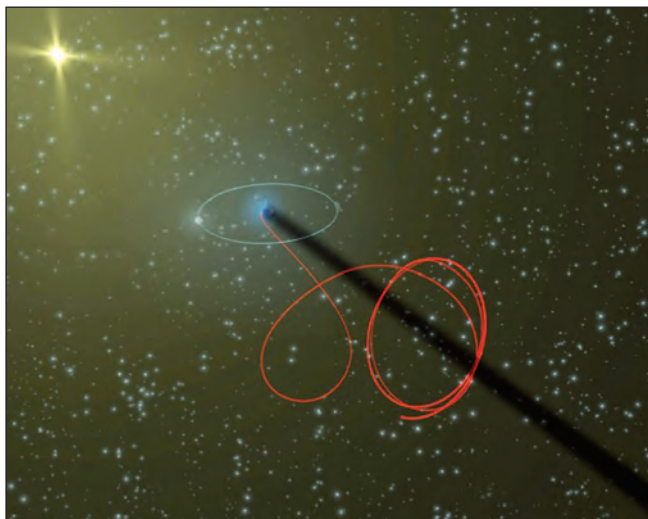


Рис. 4. Схема траєкторії польоту КО "Planck" та її орбіта поблизу точки Лагранжа L2

($-273,05$ °С), що досягалось унікальною системою пасивного охолодження в космічних умовах (до 50 К) і 3-ступеневою охолоджувальною системою рідким гелієм до 0,1 К. Завдяки цьому і була досягнута найбільша чутливість при визначенні температури мікрохвильового випромінювання.

Окрім вимірювання температури реліктового випромінювання у кожній ділянці неба апаратура визначала також і параметри Стокса його поляризації. Процес вимірювання відбувався таким чином. Супутник робив повний оберт навколо власної осі, яка була завжди паралельна осі Сонце—Земля—телескоп. Сторона супутника з боку Сонця — це сонячна батарея і екран телескопа одночасно. Таким чином, сонячна батарея увесь час повернута до Сонця, а телескоп знаходиться в її тіні. Вісь променя зору телескопа внаслідок обертання супутника навколо власної осі телескопа виписувала конус на небі з кутом при вершині 85° у протилежному від Сонця напрямі. Таким чином, за один оберт супутника одночасно на всіх робочих частотах сканується кільце на небесній сфері шириною 15° . За добу напрямом осі обертання зміщується на 1° в площині геліоцентричної орбіти супутника, оскільки навколо Сонця він обертається разом з Землею. У такий спосіб за півроку отримується карта всього неба. На рис. 6 зображена карта флуктуацій температури реліктового випромінювання, отримана КО "Planck" (проекція небесної сфери на площину в галактичних координатах).

КО "Planck": наукові результати

Результати неперервних упродовж $\sim 2,5$ років вимірювань опісля аналізувалися й інтерпретувалися командою КО "Planck" майже 3 роки, а світове наукове співтовариство терпляче чекало їх результатів. Інтерес підіграла команда телескопа VICEP2, розташованого біля Південного полюса Землі, яка в березні 2014 року на прес-конференції оголосила про

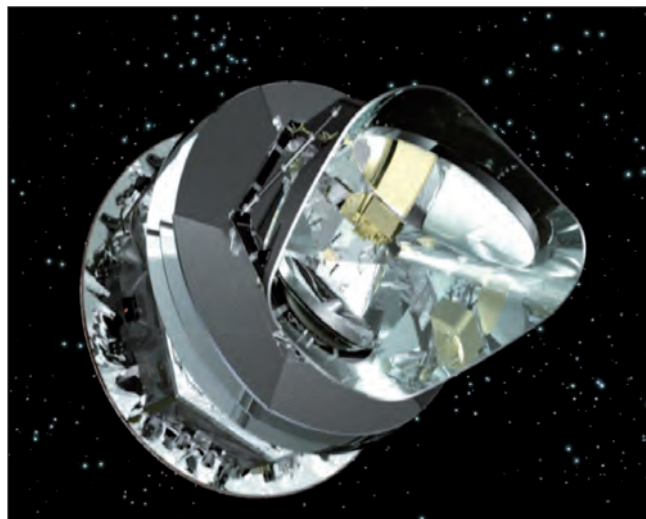


Рис. 5. Загальний вигляд КО "Planck"

впевнену реєстрацію *B*-моди поляризації реліктового випромінювання, зумовлену гравітаційним лінзуванням і реліктовими гравітаційними хвилями.

Останній ефект був фактично непрямим експериментальним доказом існування реліктових гравітаційних хвиль. Рівень достовірності реєстрації цього сигналу, як стверджували автори статті, становив майже 99,99994 % (імовірність помилки — 0,00006 %).

Це була наукова сенсація, яка свідчила також, що пріоритет відкриття рівня Нобелівської премії належить не команді КО "Planck", яка планомірно йде до цієї мети, а молодій команді проекту VICEP2, відомого, в основному, тільки спеціалістам. Коли прикрасі вщухли, почалася кропітка спільна з командою КО "Planck" перевірка. Виявилось, що якщо врахувати розподіл пилу в нашій Галактиці і його внесок у *B*-моду поляризації на основі даних КО "Planck", то реєстрації реліктових гравітаційних хвиль немає, а є тільки верхня межа, яка збігається з оголошеною в 2013 році командою КО "Planck" на основі даних про великомасштабну структуру Всесвіту, спектр потужності температури реліктового випромінювання і амплітуди *E*-моди його поляризації.

Восени того ж року вийшла спільна стаття трьох команд (КО "Planck", VICEP2 і Keck Array), в якій представлено узгоджений результат: відношення амплітуди тензорної моди до амплітуди скалярної моди збурень не перевищує 0,12 при 95%-му рівні достовірності. Це практично збіглося з раніше оголошеним результатом "Planck 2013 results". Головний результат 29,5-місячного сканування неба КО "Planck" — найбільш точні карти всього неба на дев'яти частотах з субвідсотковою точністю калібровки сигналу. Це дало можливість виокремити сигнали практично від усіх об'єктів переднього фону й отримати карту флуктуацій температури реліктового випромінювання для 98,4 % неба з чутливістю ~ 1 мкК і кутівим розділенням ~ 5 кут. хв. (рис. 6). Характеристикою цієї карти слугує спектр потужності флуктуацій температури реліктового випромінювання,

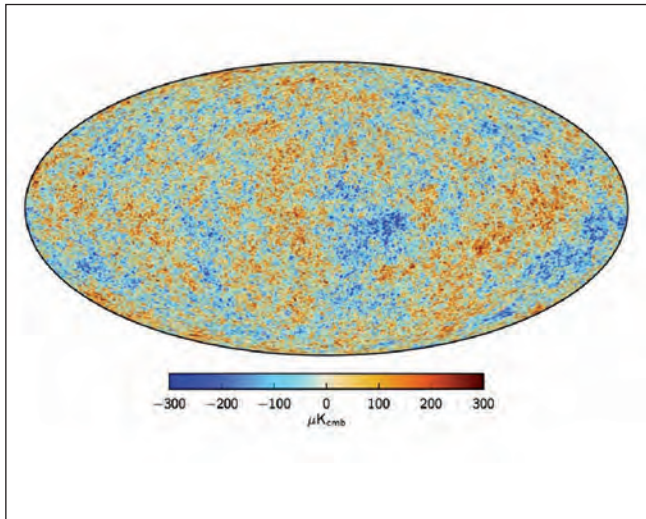


Рис. 6. Карта флуктуацій температури реліктового випромінювання всього неба в галактичних координатах

який є перетворенням Фур'є двоточної кутової кореляційної функції цих флуктуацій. Він показаний на рис. 7, де на осі абсцис замість кута θ відкладена сферична гармоніка $l = 180^\circ/\theta$. Плями на карті перетворюються на піки і впадини в спектрі потужності. Їхнє положення на графіку визначається густинами складових наповнення Всесвіту в одиницях критичної густини (баріонної речовини — Ω_b , темної матерії — Ω_{dm} і темної енергії — Ω_{de}), амплітудою σ_8 і спектральним індексом n_s початкового спектра потужності космологічних збурень в скалярній моді, значенням постійної Габбла H_0 , а також оптичною відстанню τ до сфери останнього розсіювання реліктового випромінювання.

Порівняння розрахованих передбачень з даними цього спектра, а також з іншими вимірюваннями КО “Planck”, про які говориметься нижче, дало можливість визначити всі ці параметри з найбільшою можливою на сьогодні точністю. Вони наведені в таблиці. В останньому рядку таблиці наведено вік Всесвіту в моделі з космологічною постійною. Його значення ще залежить від моделі темної енергії, але невизначеність складає всього $\sim 0,3\%$ від його величини! Дуже важливим для розуміння формування великомасштабної структури Всесвіту є надійне визначення спектрального індексу n_s первинних збурень з субвідсотковою точністю. Більш того, значення $n_s = 1$ виключено цими даними на дуже високому рівні достовірності — 99,99999% (тобто, імовірність $n_s = 1$ не перевищує 0,00001%), що дуже важливо для обмеження кількості інфляційних моделей раннього Всесвіту.

Ще донедавна такі точності вважалися недосяжними для спостережної космології, але КО “Planck” підняла планку точності вимірювань до рівня одного-двох відсотків. З даних таблиці також видно, що значення густин темної матерії і темної енергії за даними КО “Planck” визначається цілком надійно, невизначеність — менше 2%. Комбінація даних спектра

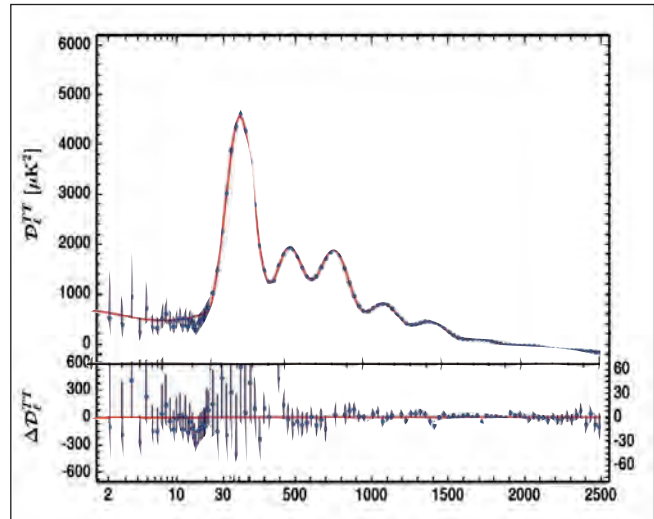


Рис. 7. Спектр потужності флуктуацій температури реліктового випромінювання, отриманий КО “Planck”

потужності збурень температури зі спектром E -моди поляризації, виміряного КО “Planck”, дозволила більш точно визначити оптичну глибину до сфери останнього розсіювання реліктового випромінювання. Це важливо для визначення епохи реіонізації, часу появи у Всесвіті перших зір і галактик. Вимірювання температури по всіх каналах настільки точні як за величиною, так і за напрямом на небі, що науковій команді вдалося виокремити з цих даних ще багато іншої інформації, важливої для космології і астрофізики.

Наприклад, слабке гравітаційне лінзування реліктового випромінювання, яке реєструється як слабке спотворення форми і розподілу галактик фону і зумовлене викривленням траєкторії променів гравітаційним полем (рис. 8) великомасштабної неоднорідності матерії, дозволило отримати карту розподілу гравітаційного потенціалу з фантастичною достовірністю $\sim 40\sigma$ (99,99999999999999%)!

Параметр	Значення $\pm 1\sigma$
Ω_b	0.0484 ± 0.0005
Ω_{dm}	0.258 ± 0.004
Ω_{de}	0.692 ± 0.012
σ_8	0.815 ± 0.009
n_s	0.9677 ± 0.0060
H_0	67.8 ± 0.9 км/с/Мпк
τ	0.066 ± 0.0016
Вік Всесвіту	13.799 ± 0.038 млрд. р.

Таблиця. Значення параметрів космологічних моделей, визначених за даними КО “Planck”

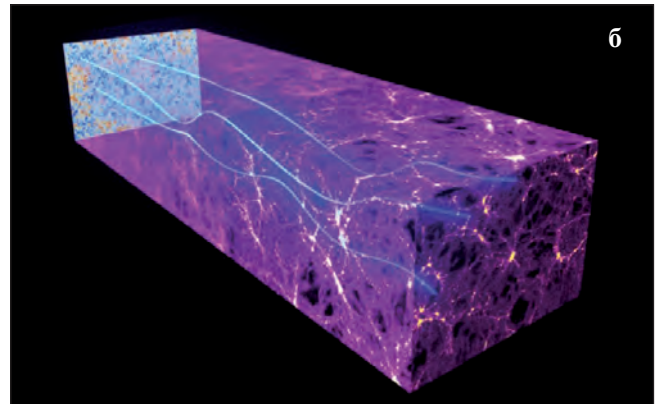
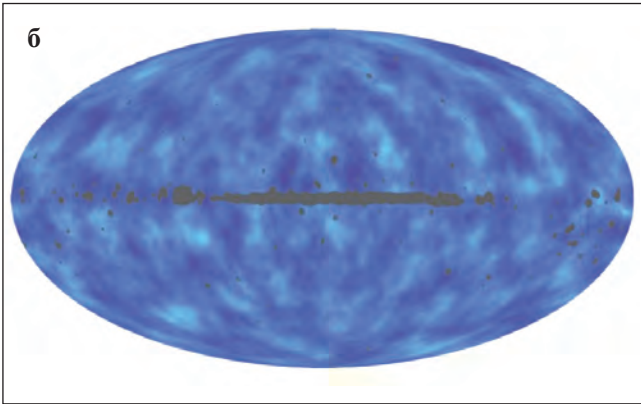


Рис. 8. а — розподіл на карті неба потенціалу гравітаційного лінзування, який відображає великомасштабну неоднорідність темної матерії;

б — схематичне зображення явища слабкого гравітаційного лінзування, на основі якого отримано розподіл його на карті неба

Космічна обсерваторія “Planck” вперше надійно на рівні достовірності 4σ (99,994%) зареєструвала інтегральний ефект Сакса—Вольфа, який є індикатором темної енергії. Крос-кореляція цього сигналу з гравітаційним лінзуванням спільно зі спектром флуктуацій температури дають значення величини густини темної енергії з невизначеністю лише 1,7 % (див. таблицю). Наукова команда КО “Planck” намагалася знайти на отриманих картах докази відхилення від нормального (гауссівського) розподілу первинних збурень, глобальної анізотропії чи нетривіальної топології *простору—часу*. Отримані обмеження є надійним доказом того, що космологічна парадигма про глобальну однорідність й ізотропність спостережуваного Всесвіту незаперечна на сучасному рівні спостережень. Такий же результат і щодо спроб зареєструвати первинне магнітне поле: якщо воно й існує, то його амплітуда на масштабах ~ 1 Мпк не перевищує рівень $\sim 10^{-9}$ Гаус.

Окрема стаття з пакета “Planck 2015 results” присвячена аналізу обмежень на моделі інфляції і генерації космологічних збурень у ранньому Всесвіті. Ключовими величинами тут є:

- значення відношення амплітуд тензорної і скалярної мод збурень;
- значення спектральних індексів у спектрах потужності збурень в цих модах;
- їх залежність від масштабу.

Уточнимо, що скалярна мода збурень — це неоднорідність густини і швидкості речовини і пов’язана з нею неоднорідність гравітаційного потенціалу, які спричиняють утворення структури Всесвіту. Тензорна мода збурень метрики — це вільні гравітаційні хвилі. Оскільки ніяких компактних масивних об’єктів у ранньому Всесвіті не було, то йдеться про первинні гравітаційні хвилі, згенеровані у ранньому Всесвіті квантовими флуктуаціями метрики, які розтягнуті інфляцією до космологічних масштабів. Так ось, для тензорної моди простору—часу поки що отримано тільки верхню границю можливого значення її амплітуди, тоді як для скалярної моди дані КО “Planck” дозволяють надійно виміряти амплітуду і значення спектрального індексу (див. таблицю).

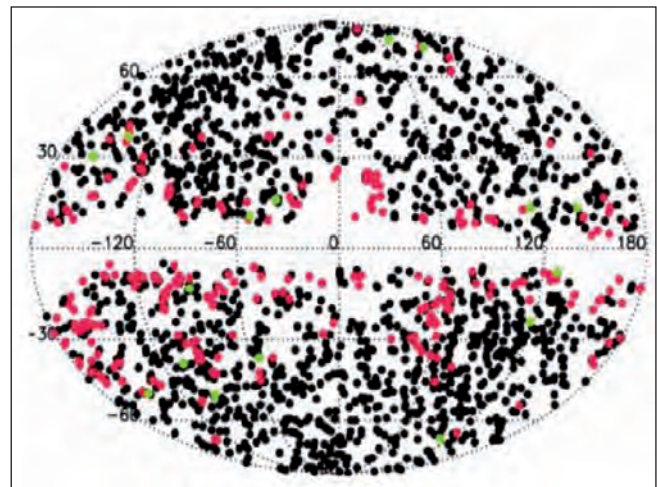


Рис.9. Розподіл на карті неба 1653 скупчень галактик, відкритих КО “Planck” за ефектом Сюняєва—Зельдовича

Дані КО “Planck” також указують на відсутність чи слабку залежність n_s від масштабу L (в Мпк): $dn_s/d\ln(L) = 0,003 \pm 0,007$. Вони підтвердили, що великомасштабна структура Всесвіту утворилася шляхом еволюції первинних гауссівських адіабатичних збурень, згенерованих в епоху інфляції. Слідів інших мод збурень — ізотермічної, зумовленої топологічними дефектами та ін., — з високим рівнем достовірності не знайдено.

На основі перерахованих властивостей Всесвіту, які стосуються інфляції, можна стверджувати, що моделі інфляції з квадратичним за польовою змінною ϕ потенціалом ($V(\phi) \propto \phi^2$) і природної інфляції (*natural inflation*) практично майже відкинуті спостережними даними, у той час як модель інфляції *Старобінського* (1980 р.) з ефективним експоненціальним потенціалом $V(\phi) \propto [1 - \exp(-\phi)]^2$ є кращою, тому що передбачає істотно менше відношення амплітуд тензорної і скалярної мод збурень. За цими обмеженнями прийнятні поки що і багато інших моделей інфляції з узагальненим лагранжіаном (галілеон, аксіонна монодромна модель та ін.). Можливо, дані про B -моду поляризації реліктового випромінювання, які все ще

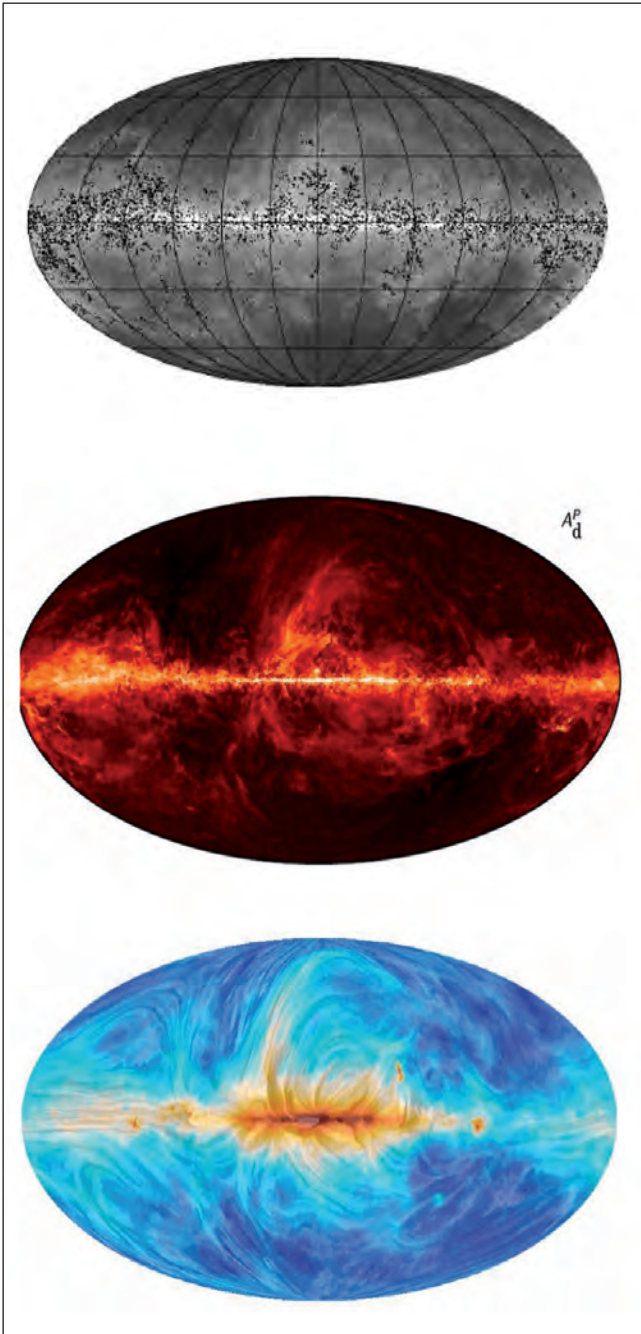


Рис. 10. Розподіл галактичних холодних джерел мікрохвильового випромінювання (верхня карта всього неба), галактичного пилу, видимого за поляризацією реліктового випромінювання (середня карта) і галактичного магнітного поля (нижня карта)

намагаються виокремити з даних КО “Planck” і очікують отримати зі спостережень команди VICEP2 і Kesk Agau, дозволять ще більше обмежити кількість можливих моделей інфляції.

Чотири статті з циклу “Planck-2015 results” присвячені результатам вимірювань ефекту Сюняєва—Зельдовича для рентгенівських скупчень галактик. Кількість скупчень галактик, зареєстрованих за ефектом Сюняєва—Зельдовича КО “Planck”, збільшена в 10 разів і дорівнює 1653 (рис. 9).

Накінець відзначимо, що результати досліджень КО “Planck” — це не тільки прорив у космології. Вони мають велике значення і для астрофізики. Далеко не повний перелік астрофізичних результатів охоплює:

- створення каталогу точкових галактичних і позагалактичних джерел усього неба в дев’яти каліброваних частотних каналах;

- отримання першої карти всього неба розподілу дифузного випромінювання переднього фону — мікрохвильового та інфрачервоного синхротронного і теплового випромінювання міжзоряного газу і пилу, а також аномальної емісії на низьких частотах;

- отримання карти всього неба і спектра потужності інфрачервоного випромінювання об’єктів переднього фону;

- створення каталогу галактичних холодних скупчень міжзоряного газу PGCC (“Planck” Galaxy Cold Clumps) — рис. 10 (верхня карта);

- визначення розподілу галактичного пилу за поляризацією його мікрохвильового випромінювання — рис. 10 (середня карта);

- вивчення розподілу мікрохвильового синхротронного випромінювання і магнітного поля Галактики — рис. 10 (нижня карта).

У короткій науково-популярній статті неможливо описати всі наукові результати досліджень КО “Planck”, але навіть із наведеного зрозуміло, що вони мають фундаментальне значення для всієї космології, оскільки є найточнішими, найбільш глибокими і самоузгодженими спостережуваними даними. Останнє означає, що про всі етапи розвитку Всесвіту від інфляції до сучасної епохи дані КО “Planck” дають незалежну від інших каналів інформацію. Більш того, будучи найбільш точними і повними, вони стають критично важливими даними, з якими необхідно буде звіряти результати і висновки практично всіх спостережних програм космології. Важливість отриманих у цьому експерименті даних для космології, їх обсяг і якість наводить на думку, що космічна обсерваторія “Planck” — це початок нової епохи в дослідженні Всесвіту — епохи КО “Planck”. ■

Джерела, з яких взяті рисунки:

Рис. 1 з сайту COBE https://map.gsfc.nasa.gov/universe/bb_cosmo_fluct.html,

Рис. 2 з сайту COBE https://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe/firas_image.cfm,

Рис. 3 з сайту SZA <http://astro.uchicago.edu/sza/overview.html>,

Рис. 4, 5 з сайту КО “Planck” <http://sci.esa.int/planck/>,

Рис. 6, 7, 8 і 10 зі статті Planck Collaboration, *arXiv:1502.01582*,

Рис. 9 зі статті Planck Collaboration, *arXiv:1502.01598*.