



ISSN 1607–2855

Том 1 • № 2 • 2000 С. 42 – 46

УДК 524.7

Визначення космологічних параметрів за даними з анізотропії реліктового випромінювання

С.Є. Апунович

Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету, Україна

Ця робота присвячена аналізу відповідності передбачень інфляційної космологічної моделі зі змішаною темною матерією та довільною кривизною простору до даних сучасних експериментів із вимірювання анізотропії температури мікрохвильового реліктового випромінювання (РВ). Інфляційний сценарій формування великомасштабної структури Всесвіту передбачає спектр потужності кутових флюктуацій температури РВ у вигляді ряду посиленій потужності (акустичних піків). Таким чином статистично достовірне виявлення такої особливості у спостережуваному спектрі на масштабі близько одного градуса є підтвердженням слушності інфляційної теорії та дає змогу визначити обмеження на космологічні параметри. Зі сукупності даних спостережень температури РВ визначено положення l_p та амплітуду такого піку A_p і за цими даними купно із обмеженнями на вміст баріонів з теорії первинного нуклеосинтезу [4], даними спостережень Наднових зір Іа-типу [21] та вимірюваннями постійної Хаббла [25], [17] було зроблено такі висновки: кривизна простору незначна, нахил первинного спектру потужності флюктуацій густини близький до одиниці, частка матерії у загальній густині становить 30%.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОСМОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПО ДАННЫМ АНИЗОТРОПИИ РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, Апунович С.Е. – Эта работа посвящена анализу соответствия предсказаний инфляционной космологической модели со смешанной темной материей и произвольной кривизной пространства с данными современных экспериментов по измерению анизотропии температуры микроволнового реликтового излучения (РИ). Инфляционный сценарий формирования крупномасштабной структуры Вселенной предсказывает спектр мощности угловых флуктуаций температуры РИ в форме ряда усиленных мощности (акустических пиков). Таким образом статистически достоверное обнаружение такой особенности в наблюдаемом спектре на масштабе приблизительно одного градуса является подтверждением правоты инфляционной теории и дает возможность определить ограничения на космологические параметры. По совокупности данных наблюдений температуры РИ определено положение l_p и амплитуда такого пика A_p и по этим данным вместе с ограничениями на содержание барионов с теории первичного нуклеосинтеза [4], данными наблюдений Сверхновых звезд I-а типа [21] и измерениями постоянной Хаббла [25], [17] было сделано следующее заключение: кривизна пространства незначительна, наклон первичного спектра мощности флуктуаций плотности близок к единице, доля материи в общей плотности составляет 30%.

DETERMINATION OF COSMOLOGICAL PARAMETERS BY THE DATA ON ANISOTROPY OF COSMIC MICROWAVE BACKGROUND. Apuanych S.Ye. – This paper is devoted to the analysis of correspondence between predictions of inflationary cosmological model with mixed dark matter, arbitrary space curvature and data of modern experiments for measurements of cosmic microwave background anisotropy (CMB). Inflationary scenario for large-scale structure formation predicts power spectrum of CMB angular fluctuations in the form of sequence of power amplifications (acoustic peaks). Therefore statistically robust identification of such peculiarity in the observed spectrum on the scale about one degree confirms the inflationary theory and gives a possibility to put constraints on the cosmological parameters. Using the observational data on CMB anisotropy, the position l_p and the amplitude of such peak A_p were determined. From these results along with constraints on baryon content from primordial nucleosynthesis theory [4], Supernovae I-a observations data [21] and Hubble constant measurements [25], [17] the following conclusion was made: space curvature is negligible, the slope of primordial power spectrum of density fluctuations is close to unity, content of matter in general density is 30%.

1. ВСТУП.

Сучасний період у космології – перехідний етап до якісно нового рівня точності та достовірності у спостереженнях великомасштабної структури та загальних властивостей Всесвіту. Тому постає питання про необхідність випробування теоретичних гіпотез на відповідність до експериментальних даних.

Задача тестування космологічної моделі полягає у співставленні передбачень теорії та сукупності спостережуваних даних і, на основі певних статистичних припущень, визначенні рівня достовірності моделі з даним набором параметрів. Таким чином знаходяться значення параметрів, для яких передбачення моделі найкраще відповідають спостереженням та здійснюється оцінювання похибок визначення параметрів на рівні певного довірчого інтервалу, наприклад як в [20].

Тут розглядається стандартний космологічний сценарій утворення великомасштабної структури через ріст малих первинних адіабатичних збурень (скалярного типу) внаслідок гравітаційної нестійкості, на фоні Фрідманівського Всесвіту довільної кривизни зі змішаною темною матерією та космологічною постійною. Первинні збурення формуються у такому сценарії внаслідок квантових процесів, що відбуваються в інфляційну епоху, та описуються первинним (післяінфляційним) масштабно-інваріантним спектром $P(k) = Ak^{n_s}$ [16].

У розділі 2 цієї роботи висвітлюються фізичні процеси, що спричиняють утворення акустичного піку в спектрі потужності реліктового випромінювання (РВ) та аналізується залежність характеристик піку від теоретичних параметрів, у розділі 3 за даними спостережень визначається його положення та амплітуда. У розділі 4 викладено метод тестування, результати та їхній аналіз. Висновки узагальнені в останньому розділі.

2. АКУСТИЧНИЙ ПІК.

В рамках теорії інфляції РВ на небесній сфері – це двомірне поле випадкових гаусівських флюктуацій температури. Це поле розкладають на сферичні гармоніки, і вся інформація про анізотропію РВ міститься в усереднених по ансамблю квадратичних амплітудах сферичних гармонік (спектрі потужності), або інакшими словами в мультиполях C_l . Задача теорії зводиться до визначення залежності цього кутового спектру потужності від космологічних параметрів.

Для цього треба розрахувати еволюцію малих (лінійних) збурень на фоні моделі Фрідмана у середовищі, що складається з частинок холодної матерії, баріонів, нейтрино та доміноване по густині енергії випромінюванням (радіаційно домінована фаза). Завдяки інтенсивним процесам розсіювання баріонна складова міцно пов'язана з випромінюванням, а холодна (нерелятивістська) складова середовища та масивні нейтрино взаємодіють з іншими складовими лише гравітаційно. Таким чином, у такому наближенні проблема зводиться до опису єдиної фотонно-баріонної рідини в гравітаційному полі, створеному іншими частинками, система рівнянь докладно викладена у [10], [11]. З моменту рекомбінації випромінювання вільно поширюється до точки спостереження, зазнаючи гравітаційного зміщення внаслідок різниці потенціалів в точках випромінювання та прийому. Флюктуації температури, зафіксовані на цей момент і спостерігаються як РВ, що надходить з умовної сфери останнього розсіювання.

У наближенні міцного зв'язку внутрішні збурення описуються рівнянням другого порядку на зразок рівняння затухаючого осцилятора зі зовнішньою силою примусу, і розв'язки будуть аналогічні акустичним коливанням. Сила примусу буде визначатися гравітаційним тяжінням всіх складових, сила відновлення буде зумовлена пружними властивостями іонізованої плазми, інертність системи визначається густиною баріонів. Пружні властивості плазми описуються швидкістю звуку, яка у свою чергу визначає звуковий горизонт. Саме після входження у звуковий горизонт збурення вступає в акустичний (осциляційний) режим, і перший момент компресії відповідає першому акустичному піку, наступна фаза розрідження відповідає наступному піку. Положення першого піку в термінах мультиполів l_p визначається відношенням кутової відстані до сфери останнього розсіювання та звукового горизонту. Кутова відстань у Всесвіті в першу чергу визначається його просторовою кривизною і таким чином положення акустичного піку найсильніше залежить від параметра кривизни, а вже потім від параметрів вмісту холодної та баріонної речовини. Амплітуда першого акустичного піку визначається в основному самогравітацією фотонно-баріонної рідини та зміщенням у рівновазі сил відновлення та примусу внаслідок присутності баріонів, а також загальною амплітудою потужності спектру, а тому сильно залежить від вмісту баріонів, сталої Хаббла [9] та нормування і нахилу n_s первинного спектру.

Таблиця 1. Значення положення піку та його амплітуди разом з похибками, визначених за різними комбінаціями експериментів. N – кількість експериментальних точок, v – кількість формальних ступенів свободи. Використано такі позначення експериментів: P – PythonV, T – TOCO98, B – Boomerang, M – MSAM, V – Viper, I – IAC, M-1 – MAXIMA-1.

Експеримент	N/v	χ^2_{\min}	l_p	Δl_p	$A_p, \mu K$	$\Delta A_p, \mu K$
Всі	78/72	194.6	223	16	66.7	7.6
P,T,B,M,V,I	46/40	105.5	211	9	70.9	7.0
T,B,M,V,I	39/33	46.7	196	10	72.1	6.9
B,M-1	30/24	48.7	196	15	63.9	5.6
B	20/14	7.0	197	7	68.6	5.1
M-1	18/12	15.7	224	15	64.9	6.1

Отже, положення першого акустичного піку однозначно дозволяє визначити параметр просторової кривизни. Інші параметри (вміст речовини, баріонів, космологічної постійної, значення постійної Хаббла) в залежність входять не прямо, а у певних комбінаціях, тобто залежність вироджена. Геометрична виродженість призводить до того ж положення акустичного піку при різних комбінаціях вмісту космологічної константи та вмісту звичайної матерії. Для висоти піку існує виродженість між вмістом баріонів, холодної темної речовини та нахилом первинного спектру. Внаслідок цього спостереження PB у даному діапазоні масштабів самі по собі не здатні обмежити значення сталої Хаббла.

В межах чисельних похибок алгоритму ні положення, ні амплітуда піку не залежать від вмісту гарячої темної матерії [20]. Для решти параметрів, а саме n_s (нахил первинного спектру), $h \equiv H_0 / 100 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ (постійна Хаббла), Ω_b , Ω_{cdm} , Ω_Λ (вміст кожної складової в одиницях критичної густини), l_p і A_p обчислювались за аналітичною апроксимацією з [9], розширеною для моделей з ненульовою кривизною, коефіцієнти перевизначались за допомогою програми CMBfast [23], [28], з використанням нормування за даними COBE [3].

3. ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПІКУ ЗІ СПОСТЕРЕЖЕНЬ.

Сучасні спостереження вимірюють з високою чутливістю анізотропію PB та охоплюють кутові масштаби від розмірів горизонту (експеримент COBE [24]) до масштабу менше одного градуса, як наприклад експерименти Boomerang [18], [6], MAXIMA-1 [12], Viper [22], IAC [7], MSAM [27], PythonV [5], TOCO98 [19] та інші.

Спостерігачі отримують після первинної обробки дані про анізотропію мікрохвильового фону у вигляді піксельної карти температури, яку за допомогою спеціальних методів обробки даних зводять діапазонних потужностей – усереднень спектру потужності у певному діапазоні мультиполів, зі зважуванням функцією вікна експерименту, які у загальному випадку описуються складнішим за гаусівський розподіл імовірності [15], [2]. Припущення про гаусівський розподіл похибок діапазонних потужностей використовується в цій роботі лише як перше наближення, для отримання консервативних оцінок. Дані до мультиполя 400 було апроксимовано за допомогою полінома п'ятого порядку методом найменших квадратів (алгоритм Левенберга-Маркварта) і за ним було визначено положення та амплітуду першого акустичного піку. Похибки визначення оцінювались шляхом варіації коефіцієнтів полінома та визначення області в просторі $\{l_p, A_p\}$, що відповідає відхиленню $\Delta\chi^2$ на рівні 1σ для потрібного числа ступенів свободи системи. Результати наведено у табл 1.

Щоб оцінити вплив систематичних похибок та неповноти вибірки (внаслідок обмеженого покриття неба), спочатку аналізувались всі наявні дані. Як випливає з таблиці, вибіркоче редагування набору даних суттєво змінює якість апроксимації (зменшується χ^2), що свідчить про суперечливість між даними різних експериментів. Але в загальному експерименти вказують на достатньо точне і достовірне визначення першого акустичного піку. Порівняльний аналіз дає підстави стверджувати, що найновіші експерименти Boomerang [6] та MAXIMA-1 [12] самі по собі вже здатні визначати необхідні характеристики піку, хоча і дещо суперечать один одному. Отримані значення амплітуди та положення узгоджуються з результатами аналізу з [13], хоча автори використовували дещо інший підхід.

Таблиця 2. Визначення космологічних параметрів за різними наборами експериментів

Експеримент	Ω_m	Ω_Λ	Ω_k	n_s
Bci	0.29 ± 0.07	0.72 ± 0.09	-0.01 ± 0.16	0.95 ± 0.06
P,T,B,M,V,I	0.31 ± 0.07	0.74 ± 0.08	-0.05 ± 0.15	0.97 ± 0.05
T,B,M,V,I	0.33 ± 0.07	0.77 ± 0.08	-0.10 ± 0.15	0.98 ± 0.06
B,M-I	0.33 ± 0.08	0.77 ± 0.08	-0.10 ± 0.16	0.93 ± 0.06
B	0.33 ± 0.07	0.77 ± 0.08	-0.10 ± 0.15	0.96 ± 0.05
M-I	0.29 ± 0.07	0.72 ± 0.09	-0.01 ± 0.16	0.94 ± 0.05

4. РЕЗУЛЬТАТИ ТА АНАЛІЗ

Як було сказано вище, дані щодо акустичного піку не можуть самостійно визначити всі параметри внаслідок геометричної виродженості. На доповнення до даних релікту використано результати спостережень глобальних властивостей Всесвіту. Для значення постійної Хаббла прийнято значення $\tilde{h} = 0.65 \pm 0.1$, яке є компромісним усередненням даних двох груп [25], [17]. Також використано обмеження на значення вмісту баріонів, що впливає з теорії нуклеосинтезу, відповідно до [4] $\tilde{\Omega}_b \cdot h^2 = 0.019 \pm 0.0024$.

Крім того, ми включили до аналізу дані вимірювань історії розширення Всесвіту за допомогою вимірювання відстаней до наднових зір (Supernova Cosmology Project, [21]), які дають суттєве обмеження на зв'язок кривизни, вкладу космологічної константи і густини речовини у загальну густину: $\tilde{\Omega}_m - 0.75 \cdot \Omega_\Lambda = -0.25 \pm 0.125$.

Ці точки даних разом з положенням та висотою піку складають вектор експериментальних даних, за яким визначається вектор космологічних параметрів $\{\Omega_k, \Omega_\Lambda, \Omega_b, n_s, h\}$. Визначались такі значення цих

параметрів, що мінімізують $\chi^2 = \sum_{i=1}^5 \left(\frac{\tilde{y}_i - y_i}{\Delta \tilde{y}_i} \right)^2$, де $\tilde{y}_i, \Delta \tilde{y}_i$ – вектор спостережуваних даних разом з

похибками, y_i – вектор відповідних передбачень теорії. Для мінімізації використовувався метод Левенберга-Марквардта, протестований на збіжність та незалежність від початкових значень. Похибки обчислення параметрів визначались із матриці коваріантності для параметрів. Отримані обмеження викладено у табл.2. У межах похибок результати узгоджуються з висновками аналогічних робіт, як наприклад [26], [1], [14]. В різних рядках розглядаються випадки, коли певні експериментальні точки не включаються до процедури мінімізації. Як видно, параметр кривизни достатньо чітко визначається як найновішими експериментами кожним самостійно, так і всією сукупністю даних. Подані похибки достатньо великі, але дозволяють відсіяти на високому рівні достовірності цілі області простору параметрів.

ВИСНОВКИ

В цій роботі було здійснено якісне і кількісне тестування інфляційної космологічної моделі. За сукупністю даних з вимірювань анізотропії РВ було достовірно визначено існування акустичного піку в спектрі потужності на $l \sim 200$, що узгоджується з перебіченнями теорії еволюції космологічних збурень в інфляційному сценарії. Було визначено положення й амплітуду такого піку і разом з іншими даними використано для обчислення кількісних обмежень на параметри кривизни, вмісту густини космологічної постійної в загальній густині, вмісту баріонів, та обмеження на форму первинного спектру потужності. Таким чином встановлено:

- 1) кривизна простору незначна (середня густина енергії рівна критичній);
- 2) вміст речовини у загальній густині енергії становить близько третини, решта доповнюється внеском густини енергії космологічної постійної;
- 3) первинний (післяінфляційний) спектр потужності флюктуацій густини близький до плоского масштабно-інваріантного.

1. Balbi A., et al., 2000, preprint astro-ph/0005124
2. Bond J.R., et al., 2000, *Astrophysical Journal*, 533, 1, 19-37, preprint astro-ph/9808264
3. Bunn E.F., White M., 1997, *Astrophysical Journal*, 480, 6-21, preprint astro-ph/9607060v2
4. Burles S., Nollett K.M., Truran J.N., Turner M.S., 1999, *Phys.Rev.Lett.*, 82, 4176
5. Coble, K. et al., 1999, *Astrophysical Journal Letters*, 519, 1, L5-L8, preprint astro-ph/9902195
6. de Bernardis P. et al., 2000, *Nature*, 404, 995
7. Dicker S.R., Melhuish S.J., Davies R.D. et al., 1999, *Mon. Not. of RAS*, 309, 750
8. Dodelson S., Knox L., 2000, *Phys.Rev.Lett.*, 84, 3523
9. Fstathiou G., Bond J.R., 1999, *MNRAS*, 304, 75
10. Hu W., Sugiyama N., 1995, *Phys.Rev.D.*, 51, 2599
11. Hu W., White M., 1996, *ApJ*, 471, 30-51
12. Hahany S. et al., 2000, preprint astro-ph/0005123
13. Knox L., Page L., 2000, *Phys.Rev.Lett.*, 85, 1366-1369, preprint astro-ph/0002162
14. Lange A.E., et al., 2000, preprint astro-ph/0005004
15. LeDour M., et al., 2000, preprint astro-ph/0004282
16. Liddle A.R., 1995, *Phys.Rev.D.*, 51, 5347
17. Madore, B.F. et al., 1999, *ApJ*, 515, 2941
18. Mauskopf, P. et al., 2000, *Astrophysical Journal Letters*, 536, L59-L62, preprint astro-ph/9911444.
19. Miller, A.D. et al., 1999, *ApJL*, 524, L1
20. Novosyadlyj B., et al., 2000, *Astronomy and Astrophysics*, 356, n2, 418
21. Perlmutter S. et al., 1999, *Astrophysical Journal*, 517, 565-586, preprint astro-ph/9812133
22. Peterson J.B. et al., 1999, preprint astro-ph/9910503
23. Seljak U., Zaldarriaga M., 1996, *Astrophysical Journal*, 469, 437
24. Smoot G.F., 2000, *Proceedings of 3K Cosmology Conference* ed. Melchorri et al., preprint astro-ph/9902027
25. Tammann, G.A., Federspiel, M., 1997, in "The Extragalactic Distance Scale", (eds.) M. Livio, M. Donahue, N. Panagia (Cambridge: Cambridge Univ. Press)
26. Tegmark M., et al., 2000, preprint astro-ph/0008167
27. Wilson G.W. et al., 2000, *Astrophysical Journal*, 532, 1, 57-64, preprint astro-ph/9902047
28. Zaldarriaga M., Seljak U., 1999, preprint astro-ph/9911219

Надійшла до редакції 20.09.2000