

2. Караченцев И.Д., Караченцева В.Е., Кудря Ю.Н., Парновский С.Л. Коллективные движения галактик из каталога FGC на масштабах 100 Мпк // Астрон. журн. – 2000. – Т. 77. – С. 175–187.
3. Караченцев И.Д., Караченцева В.Е., Кудря Ю.Н. Некоторые свойства плоских галактик из каталога FGC // Письма в Астрон. журн. – 1999. – Т. 25, №1. – С. 3–9.
4. Кудря Ю.Н., Караченцев И.Д., Караченцева В.Е., Парновский С.Л. Общие свойства каталога плоских галактик. Функция диаметров // Письма в Астрон. журн. – 1997. – Т. 23, №1. – С. 15–23.
5. Кудря Ю.Н., Караченцев И.Д., Караченцева В.Е., Парновский С.Л. Максимальные видимые и истинные сжатия плоских галактик // Письма в Астрон. журн. – 1994. – Т. 20, №1. – С. 13–17.
6. Кудря Ю.Н., Караченцев И.Д., Караченцева В.Е., Парновский С.Л. Общие свойства каталога плоских галактик. Видимые сжатия и морфологические типы // Письма в Астрон. журн. – 1997. – Т. 23, №9. – С. 652–658.
7. Кудря Ю.Н., Караченцев И.Д., Караченцева В.Е., Парновский С.Л. Видимые величины и диаграмма Талли-Фишера для галактик FGC каталога // Письма в Астрон. журн. – 1997. – Т. 23, №10. – С. 730–735.
8. Парновский С.Л., Кудря Ю.Н., Караченцева В.Е., Караченцев И.Д. Коллективное движение плоских галактик на масштабах 100 Мпк в квадрупольном и октупольном приближениях // Письма в Астрон. журн. – 2001. – Т. 27, №12. – С. 890–900.
9. Парновский С.Л., Тугай А.В. Коллективные движения галактик на масштабе 100 Мпк с использованием новых данных // Письма в Астрон. журн. – 2004. – Т. 30, №6. – С. 403–413.
10. Парновский С.Л., Гайдамака О.З., Шаров П.Ю. Оценка космологических параметров по peculiar скоростям плоских галактик каталога RFGC // Кинематика и физика небес. тел. – 2004. – Т. 20, № 2. – С. 112–117.
11. Парновский С.Л. Определение комбинации космологических параметров $\Omega_m \sigma_8$ // Письма в Астрон. журн. – 2008. – Т. 34, №7. – С. 496–502.
12. Шаров П. Ю., Парновский С. Л. Распределение плотности материи на масштабах 75 Мпк, полученное методом POTENT по коллективным движениям RFGC галактик // Письма в Астрон. журн. – 2006. – Т. 32, №5. – С. 323–332.
13. Karachentsev I.D. Thin edge-on galaxies as a tool for the investigation of large-scale streaming motions in the universe // Astron. J.–1989.–Vol. 97, №6. – P. 1566–1576.
14. Karachentsev I.D., Karachentseva V.E., Parnovsky S.L. Flat Galaxy Catalogue // Astron. Nachr. – 1993. – Vol. 314, №3. – P. 97–222.
15. Karachentsev I.D., Karachentseva V.E., Kudrya Yu.N., Parnovsky S.L. "DISKOTEKA" – a new catalog of thin edge-on galaxies // Astron. Astrophys. Transactions. – 1995. – Vol.4. – P.143-151.
16. Karachentsev I.D., Karachentseva V.E, Kudrya, Yu. N., Sharina, M. E., Parnovsky S.L. The Revised Flat Galaxy Catalogue. // Bull. SAO – 1999. – Vol. 47. – P.5-185.
17. Karachentsev I.D., Karachentseva V.E, Kudrya, Yu. N., Parnovsky S.L. Large-scale streaming of flat galaxies // Astron. Nachr. – 1995. – Vol. 316, №6. – P.369-380.
18. Karachentsev I.D., Karachentseva V.E, Kudrya, Yu. N., Makarov, D. I., Parnovsky S.L. A list of peculiar velocities of galaxies from the RFGC catalogue. // Bull. SAO – 2000. – Vol. 50. – P. 5–38.
19. Parnovsky S.L., Karachentsev I.D., Karachentseva V.E. Global anisotropy of galaxy orientations // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. – 1994. – Vol. 268. – P. 665–680.
20. Parnovsky S. L., Sharov P. Yu., Gaydamaka O. Z. Estimation of cosmological parameters from peculiar velocities of flat edge-on galaxies// Astrophys. Space Sci. – 2006. – Vol. 302, № 1-4. – P. 207–211.
21. Parnovsky S. L., Tugay A. V. Description of the new list of peculiar velocities of RFGC galaxies // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія – 2006. – Вип. 43. – С. 51–54.

Надійшла до редколегії 13.05.09

УДК 524.8

С. Хміль

СПОСТЕРЕЖНІ ОБМЕЖЕННЯ НА КОСМОЛОГІЧНУ СТАЛОЇ

Подано короткий огляд основних методів визначення космологічної сталої Λ із спостережень.

A short review of the principal methods for determination of the cosmological constant Λ is given.

Вступ. З історичної точки зору космологічна стала Λ – це додатковий член у рівняннях загальної теорії відносності, який був введений Айнштайном чисто формально для забезпечення існування статичних космологічних моделей [10]. Коли в кінці 20-х рр. минулого століття було виявлено, що Всесвіт є нестационарним, зникла потреба у збереженні цієї сталої, і про неї згадували лише принагідно, як про штучний засіб узгодження теорії та спостережень. Проте у другій половині ХХ ст., внаслідок швидкого накопичення спостережних даних та під впливом досягнень квантової теорії поля, поступово стала викристалізовуватись думка, що ця стала може репрезентувати фізичні властивості вакууму. Ця точка зору узгоджується з твердженням загальної теорії відносності про те, що всі форми енергії та матерії мусять впливати на кривину простору-часу. Особлива зацікавленість у визначенні величини космологічної сталої з'явилась у 1990-х рр. у зв'язку з відкриттям прискореного розширення Всесвіту.

Ненульова космологічна стала Λ впливає на багато космологічних параметрів і характеристик. Найголовніші серед них такі: динаміка розширення, вік Всесвіту, міри віддалей, супутня густина об'єктів, зростання лінійних збурень, імовірності гравітаційного линзування (більш детальний виклад див., наприклад, в огляді [4]). Іншими словами, як просторова геометрія, так і еволюція Всесвіту в минулому можуть значно змінитися за наявності космологічної сталої. Існують декілька методів спостереженого визначення величини Λ . Найважливіші з цих методів та результати їх застосування подані у цьому короткому огляді.

Зауважимо, що при аналізі спостережень звичайно використовують замість космологічної сталої Λ безрозмірний параметр $\Omega_\Lambda = \Lambda/3H_0^2$, де H_0 – стала Хаббла. Для густини матерії ρ_M використовується аналогічний параметр $\Omega_M = 8\pi G\rho_M/3H_0^2$. Причому у простово-плоскому Всесвіті $\Omega_M + \Omega_\Lambda = 1$ (докладніше див. [4]). Рівняння стану вакууму має досить незвичний вигляд: $p_\Lambda = w\rho_\Lambda$, де $w = -1$, тобто вакуум має негативний тиск. Величина параметра w також може бути визначена із спостережень.

Загальні міркування щодо величини космологічної сталої. Виявляється, що можна встановити обмеження на величину космологічної сталої, користуючись загальними відомостями про Всесвіт. Розглянемо деякі з них.

1. **Об'єкти з великим червоним зміщенням.** Наявність цих об'єктів однозначно виключає деякі екзотичні всевіти з параметром космологічної сталої $\Omega_\Lambda > 1$. Існування квазарів з великими червоними зміщеннями ($z > 5$) та

космічного мікрохвильового фонового випромінювання (КМФ) при $z \sim 1000$ унеможлиблює моделі Всесвіту, в яких відсутній Великий Вибух (інколи їх називають всесвітами з відскоком, “bouncing” universes). Для того, щоб очікувати на відскок при досить малому масштабному факторі, який би відповідав червоному зміщенню КМФ, наш Всесвіт мусив би мати дуже низький вміст матерії ($\Omega_M < 10^{-9}$ проти спостережного $\Omega_M \approx 0.3$). Сповільнені всесвіти продукують різноманіття незвичних спостережних ефектів і виключаються завдяки наявності гравітаційно-лінзованих квазарів з великим червоним зміщенням (див. [12, 13]).

2. Проблема віку. Одним з найбільш нездоланих свідочств на користь існування космологічної сталої вважався факт, що вік Всесвіту без космологічної сталої менший за вік найстаріших зірок, що спостерігаються у кульових скупченнях нашої галактики Чумацького Шляху та інших галактик.

Відповідно до [5], дослідження з нуклеохронології показують, що найстаріші зірки мають вік 15.2 ± 3.7 мільярдів років. Криві охолодження білих карликів вказують на мінімальний вік найстаріших зірок у 8 мільярдів років. Найкраща оцінка віку найстаріших зірок базується на абсолютній зоряній величині точки повороту головної послідовності у кульових скупченнях. Найбільш старі кульові скупчення мають вік 11.5 ± 1.3 мільярдів років, звідки випливає, що мінімальний вік Всесвіту складає $T \geq 9.5$ мільярдів років на рівні достовірності 95%. Вивчення космічного мікрохвильового фонового випромінювання дозволило визначити вік Всесвіту у 14.0 ± 0.5 мільярдів років [18].

Якщо припустити, що Всесвіт складається виключно з матерії (світної та темної), яку ми можемо знайти ($\Omega_M \approx 0.3$), тоді вік Всесвіту налічує від 10 до 13 мільярдів років. Ситуація значно погіршується, якщо вимагати, щоб Всесвіт був плоским з домінуванням матерії ($\Omega_M = 1$); тоді його вік був би лише 8–11 мільярдів років. Проте плоский Всесвіт з матерією на спостережному рівні ($\Omega_M \approx 0.3$) та з космологічною сталою має вік 12–16 мільярдів років, сумісний з віком найстаріших зірок.

Зауважимо, що “проблема віку” втратила свій вирішальний характер завдяки результатам, отриманим на супутнику *Hipparcos* [6]. Відомо, що і вік кульових скупчень, і вік Всесвіту (через сталу Хаббла H_0) залежать від шкали віддалей, що використовується. Вимірювання паралаксів декількох найближчих цефеїд на супутнику *Hipparcos* привело до перегляду шкали віддалей. В результаті цього перегляду значення сталої Хаббла наблизилося до рівня біля $60 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{Мпк}^{-1}$, що надало змогу повернутися до величин віку відкритої та плоскої моделей Всесвіту з домінуванням матерії, вказаних вище (відповідно $13 \cdot 10^9$ та $11 \cdot 10^9$ років). Перегляд також вніс поправки до віку найстаріших кульових скупчень, знизивши його до 10 – 14 мільярдів років. Таким чином, на думку багатьох авторів, “проблема віку” Всесвіту більше не є основним приводом для розгляду ненульової космологічної сталої (див., наприклад, [3, 6, 20]).

Після цих загальних зауважень перейдемо до розгляду спостережних методів визначення величини космологічної сталої Λ .

Статистика гравітаційного лінзування. Світло від об'єктів з високим червоним зміщенням може лінзуватися великими концентраціями маси, такими як галактики або скупчення галактик. Це лінзування приводить до появи на небі декількох зображень одного і того самого об'єкта. Космологічна стала впливає на геометрію й еволюцію Всесвіту, таким чином роблячи статистику гравітаційного лінзування потужним засобом визначення меж значень космологічної сталої у нашому Всесвіті. Зокрема, до статистичного аналізу можна залучити спостережне число лінзованих джерел, червоні зміщення лінз та джерел, зоряні величини джерел, кутові розділення між парами зображень. Квазари з великим червоним зміщенням є хорошими джерелами випромінювання для вивчення гравітаційного лінзування, оскільки вони знаходяться на космологічних віддальях, а еліптичні галактики – хорошими лінзами. Хоча лінзування чутливе до значення космологічної сталої, існують певні невизначеності стосовно конкретних чисел та певна специфіка у кожній заданій космологічній моделі. Для того, щоб акуратно розрахувати “оптичну товщу” для лінзування фонового джерела, необхідно знати розподіл галактик-лінз, їхню просторову густину, розподіл гравітаційних потенціалів в лінзах, еволюцію параметрів в залежності від червоного зміщення. Існують також спостережні ефекти селекції, які треба враховувати кожного разу при розгляді певної вибірки джерел (наприклад, більш близькі лінзи легше ототожнити, ніж віддалені). Загалом, у теоретичних передбаченнях про гравітаційне лінзування ці невизначеності можуть приводити до похибки на рівні множника 2. Проте це не так погано, оскільки відносні передбачення для різних космологічних моделей можуть різнитися порядком величини: у випадку плоских моделей, всесвіт з $\Omega_\Lambda = 1$ містить у 10 разів більше лінз, ніж всесвіт з $\Omega_\Lambda = 0$ [15]. Кінець кінцем, оскільки більші значення Ω_Λ відповідають більшій кількості гравітаційних лінз, цей метод надає життєздатний шлях визначення верхньої межі значення космологічної сталої.

Кочанек [16] виконав ретельний аналіз статистики гравітаційного лінзування, включаючи кількість лінз, їхні червоні зміщення, зоряні величини та кутові розділення пар зображень. Він дослідив різні моделі лінз та прийняв до уваги статистичні невизначеності числа лінз, галактик та квазарів, а також параметрів, що пов'язують світності галактик з їхніми динамічними характеристиками. В результаті цієї копіткої роботи він знайшов верхню межу космологічної сталої $\Omega_\Lambda < 0.66$ на рівні достовірності 95%. Для моделей Всесвіту з $\Omega_\Lambda = 0$ він показав, що $\Omega_M > 0.2$ з рівнем достовірності 90%.

Інші дослідники [23] використали вибірку із 7 лінзованих квазарів з метою тестування різних космологічних моделей. Для визначення Ω_Λ і Ω_M вони використовували комбіновані ймовірності того, що лінзовані системи мають спостережне розділення зображень, спостережні червоні зміщення лінзи та джерела і спостережні зоряні величини

лінз. Для плоского Всесвіту вони знайшли, що $\Omega_{\Lambda} = 0.64_{-0.26}^{+0.15}$. Вони також встановили, що Всесвіт з $\Omega_M = 1$ можна виключити на рівні достовірності у 97% і що відкриті моделі з домінуванням матерії є менш вірогідними, ніж плоскі моделі з ненульовою космологічною сталою.

Японські науковці виконали аналіз статистики лінз, використовуючи заново переглянуті дані про функцію світності та про внутрішні дисперсії швидкостей у галактиках, пов'язані із розподілом гравітаційного потенціалу [7]. Вони порівняли свої нові теоретичні передбачення повного числа лінз та розділень зображень з величинами, отриманими на космічному телескопі *Hubble* за програмою *Hubble Space Telescope Snapshot Lens Survey*. В результаті виявилось, що спостереження найкраще узгоджуються з плоскою моделлю Всесвіту, в якій $\Omega_{\Lambda} \approx 0.8$. В подальшій роботі цих же авторів [8] подані нові обмеження на космологічну сталу, побудовані на переглянутих відомостях про функцію світності та внутрішню динаміку галактик типів E/S0. Порівняння моделей з існуючими оглядами лінз дозволило їм зробити висновок, що найбільшу перевагу має плоска модель Всесвіту з $\Omega_{\Lambda} = 0.7_{-0.2}^{+0.1}$.

У роботі [22] визначені межі значень Ω_{Λ} і Ω_M , що впливають із статистики лінзування. З цією метою автори використали огляд лінз всього неба *CLASS (Cosmic Lens All-Sky Survey)* та Слоунівський огляд *SDSS (Sloan Digital Sky Survey)* і провели аналіз даних про локальну функцію розподілу дисперсії швидкостей в галактиках типу E/S0. Для плоского Всесвіту автори знайшли, що $\Omega_{\Lambda} = 0.74_{-0.11}^{+0.09}$, якщо 10 з 13 лінз огляду *CLASS* завдячують своїй появі галактикам-лінзам ранніх типів, або $\Omega_{\Lambda} = 0.78_{-0.10}^{+0.07}$, якщо 12 лінз огляду – ранні галактики. Їхні результати добре узгоджуються з недавніми дослідженнями космологічної сталої за допомогою наднових зірок типу Ia, про що йтиме мова в наступному розділі.

Наднові зірки з великим червоним зміщенням. Один з впливів космологічної сталої полягає у зміні зв'язку між космологічною віддаллю та червоним зміщенням. В принципі, якщо є набір об'єктів які мають або стандартний власний розмір або стандартну власну світність, можна визначити космологічні віддалі до цих об'єктів. Якщо червоні зміщення цих об'єктів відомі, можна однозначно визначити космологічні параметри: сталу Хаббла H_0 і параметри густини Ω_M та Ω_{Λ} . Однак на практиці дуже важко знайти набір об'єктів, який би не потерпав від ефектів еволюції, тобто щоб всі його члени мали один і той самий розмір або одну й ту саму світність при всіх червоних зміщеннях. Проте виявилося що принаймні один такий набір, вільний від еволюційних ефектів, здається існує, і цей набір – наднові зорі типу Ia. Головна особливість поведінки цих наднових у тому, що їхня абсолютна зоряна величина, а значить і віддаль до них, може бути визначена за формою їхніх кривих блиску та за їхніми спектрами, що змінюються у часі.

У 1997 р. Перлматтер та інші [25] повідомили про те, що вони виділили перші 7 наднових зір типу Ia із загальної кількості 28 об'єктів, знайдених за програмою пошуку наднових з великим червоним зміщенням *Supernova Cosmology Project*. Для Всесвіту, що містить матерію і космологічну сталу, вони знайшли, що $\Omega_{\Lambda} = 0.06_{-0.34}^{+0.28}$ або що відповідна верхня межа становить $\Omega_{\Lambda} < 0.51$ (рівень достовірності 95%). Якщо у Всесвіті повністю домінує матерія, тоді $\Omega_M = 0.88_{-0.60}^{+0.69}$. Хоча цей результат ніби свідчив на користь того, що космологічна стала відсутня, проте великий рівень похибок не дозволив авторам зробити остаточний висновок. В подальшому, за рахунок накопичення все нових спостережних даних, величини похибок були суттєво зменшені, демонструючи неабияку могутність методу наднових зірок у питанні визначення космологічної сталої.

В роботі [27] був використаний набір з 16 наднових з великим червоним зміщенням, знайдених за проектом *High-z Supernova Search*, і додатково набір з 34 близьких наднових з метою визначення обмежень на величину сталої Хаббла, густину маси, космологічну сталу, параметр сповільнення та динамічний вік Всесвіту. Використавши два різних методи підгонки кривих блиску наднових, у випадку плоского Всесвіту автори знайшли, що $\Omega_{\Lambda} = 0.68 \pm 0.10$ і $\Omega_{\Lambda} = 0.84 \pm 0.09$. Якщо не вимагати, що Всесвіт є просторово плоским, тоді $\Omega_{\Lambda} > 0$ на рівні достовірності 98%.

У 1999 Перлматтер і його співпрацівники сповістили про результати аналізу спостережень 42 наднових зірок, відкритих за програмою *Supernova Cosmology Project* [26]. Вони знайшли, що у плоскому Всесвіті $\Omega_{\Lambda} = 0.71_{-0.09}^{+0.08}$. Якщо ж відмовитись від умови $\Omega_M + \Omega_{\Lambda} = 1$, тоді з достовірністю 99% необхідно, щоб $\Omega_{\Lambda} > 0$.

Тонрі та інші відкрили і проспостережали 8 нових наднових зірок в інтервалі червоних зміщень $z = 0.3 - 1.2$ [30]. Ці незалежні спостереження, виконані схожим, але іншим методом, підтвердили результати про те, що фотометричні віддалі до наднових зірок свідчать на користь прискореного розширення Всесвіту. Якщо параметр у рівнянні стану темної енергії $w = -1$, тобто вона описується космологічною сталою, тоді $\Omega_{\Lambda} - 1.4\Omega_M = 0.35 \pm 0.14$. Якщо обмежитись розглядом плоского Всесвіту, тоді, незалежно від будь-яких вимірів великомасштабної структури, $\Omega_M = 0.28 \pm 0.05$ або ж $\Omega_{\Lambda} = 0.72$.

Учасники групи *Supernova Cosmology Project* доповіли про виміри космологічних параметрів за даними про 11 наднових з червоними зміщеннями $z = 0.36 - 0.86$ [17]. Відповідні високоякісні криві блиску були отримані за допомогою фотометра WFPC2, встановленого на орбітальному телескопі *Hubble*. Припускаючи, що Всесвіт є плоским, а параметр рівняння стану темної енергії має стале значення $w = -1$, вони знайшли, що $\Omega_{\Lambda} = 0.75_{-0.07}^{+0.06}$ (статистична похибка) ± 0.04 (ідентифіковані систематичні похибки).

Ще один результат, опублікований в [28], базується на відкритті та спостереженнях 16 наднових зірок на орбітальному телескопі *Hubble*. Припускаючи, що Всесвіт є плоским з космологічною сталою, було визначено, що

$\Omega_{\Lambda} = 0.71_{-0.03}^{+0.05}$. Подальша робота в цьому напрямку дозволила авторам збільшити вибірку наднових зірок до 23 [29] і підтвердити оцінки, отримані в попередній роботі. Аналогічні висновки та результати містяться також у [9].

Космічне мікрохвильове фонове випромінювання. Кутовий спектр потужності анізотропії температури КМФ строго залежить від значень більшості космологічних параметрів та від фізичних процесів у ранньому Всесвіті. Таким чином, вивчення цього спектру є ефективним знаряддям для визначення обмежень на вибір реалістичних космологічних моделей (див., наприклад, огляд [14] та подані там посилання) і може допомогти у розв'язку питання про існування космологічної сталої кількома шляхами.

Наприклад, якщо адіабатичні збурення відповідають за великомасштабну структуру, тоді положення першого акустичного піку в спектрі КМФ може бути використане як модельно-незалежний зонд для визначення повної густини $\Omega = \Omega_M + \Omega_{\Lambda}$. На відміну від цього, діаграма Хаббла для наднових зірок з великими червоними зміщеннями дозволяє визначити головним чином параметр сповільнення $q_0 = \Omega_M/2 - \Omega_{\Lambda}$. Тому об'єднання цих двох вимірів може надати тісні обмеження окремо на Ω_M та Ω_{Λ} .

Присутність космологічної сталої можна також вирізнити за допомогою КМФ через додаткову велико-кутову анізотропію, яка продукується цією сталою за рахунок раннього, інтегрованого в часі ефекту Сакса-Вольфа, викликаного збуреннями густини при червоних зміщеннях, менших за декілька одиниць. Якщо космологічна стала існує, повинна існувати певна взаємна кореляція між температурою КМФ і деякими індикаторами розподілу мас, наприклад позагалактичним рентгенівським фоном або слабким лінзуванням при цих червоних зміщеннях.

Балбі та інші [1] одними з перших застували кутовий спектр потужності, отриманий під час першого польоту зонду *MAXIMA* (*Millimeter-wave Anisotropy Experiment Imaging Array*), для визначення найбільш вірогідних значень космологічних параметрів, максимізуючи правдоподібність спостережних даних. В результаті на рівні достовірності 95% вони отримали такі межі: $0.45 < \Omega_{\Lambda} < 0.75$ і $0.25 < \Omega_M < 0.50$.

Нокс із співробітниками [18] використали комбінацію вимірів анізотропії космічного мікрохвильового фонового випромінювання із значенням сталої Хаббла $H_0 = 72 \pm 8 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$, отриманого за проектом *Hubble Space Telescope Key Project* [11], і знайшли, що у плоскому Всесвіті $\Omega_{\Lambda} > 0.4$ з достовірністю 95%.

Щоб зняти виродження стосовно вибору космологічної моделі, Мелькіоррі та інші [21] комбінували найбільш свіжі дані вимірів анізотропії КМФ із обмеженнями, які були отримані з функції мас скупчень галактик, визначеної завдяки даним Слоунівського огляду *SDSS* [2]. Це дозволило знайти значення низки космологічних параметрів, зокрема величину параметра густини матерії: $\Omega_M = 0.26_{-0.07}^{+0.06}$.

Одні з найбільш надійних оцінок космологічної сталої отримані за проектом *WMAP* (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*). Вже дані першого року спостережень за цим проектом [24] дали всі підстави стверджувати, що ми живемо у плоскому Всесвіті, в якому домінує космологічна стала Λ та є певна кількість холодної темної матерії (скорочено, так званий Λ CDM-Всесвіт), а саме $\Omega_{\Lambda} \approx 0.73$, $\Omega_M \approx 0.27$. Припускаючи плоску Λ CDM-космологію, вони знайшли $\Omega_{\Lambda} > 0$ (з рівнем достовірності 95%, тільки статистичні похибки) з піком правдоподібності при $\Omega_{\Lambda} = 0.68$. Спостереження за цим проектом тривають до сьогодні. Останні результати, що базуються на 5-річних спостереженнях і враховують також дослідження баріонних акустичних осциляцій та фотометрію наднових зірок, опубліковані в [19]. Якщо Всесвіт є просторово-плоским, тоді $\Omega_{\Lambda} = 0.726 \pm 0.015$. На сьогодні ця оцінка вважається найкращою і переконливо засвідчує наявність темної енергії у Всесвіті, яку репрезентує космологічна стала.

- Balbi A., Ade P., Bock J. et al. Constraints on Cosmological Parameters from MAXIMA-1 // *Astrophys. J.* – 2000. – Vol. 545, No. 1. – P. L1–L4.
- Bahcall N. A., Dong F., Bode P. et al. The Cluster Mass Function from Early Sloan Digital Sky Survey Data: Cosmological Implications // *Astrophys. J.* – 2003. – Vol. 585, No. 1. – P. 182–190.
- Carretta E., Gratton R. G., Clementini G., Fusi Pecci F. Distances, Ages, and Epoch of Formation of Globular Clusters // *Astrophys. J.* – 2000. – Vol. 533, No. 1. – P. 215–235.
- Carroll S. M., Press W. H., Turner E. L. The Cosmological Constant // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* – 1992. – Vol. 30. – P. 499–542.
- Chaboyer B. The Age of the Universe // *Phys. Rept.* – 1998. – Vol. 307, No. 1. – P. 23–30.
- Chaboyer B., Demarque P., Kernan P. J., Krauss L. M. The Age of Globular Clusters in Light of Hipparcos: Resolving the Age Problem? // *Astrophys. J.* – 1998. – Vol. 494, No. 1. – P. 96–110.
- Chiba M., Yoshii Y. Do Lensing Statistics Rule Out a Cosmological Constant? // *Astrophys. J.* – 1997. – Vol. 489, No. 485–488.
- Chiba M., Yoshii Y. New Limits on a Cosmological Constant from Statistics of Gravitational Lensing // *Astrophys. J.* – 1999. – Vol. 510, No. 1. – P. 42–53.
- Clocchiatti A., Schmidt B.P., Filippenko A.V. et al. Hubble Space Telescope and Ground-based Observations of Type Ia Supernovae at Redshift 0.5: Cosmological Implications // *Astrophys. J.* – 2006. – Vol. 642, No. 1. – P. 1–21.
- Einstein A. Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie // *Sitzungsber. preuss. Akad. Wiss.* – 1917. – Vol. 1, No. 1. – S. 142–152.
- Freedman W. L., Madore B. F., Gibson B. K. et al. *Astrophys. J.* Final Results from the *Hubble Space Telescope* Key Project to Measure the Hubble Constant // *Astrophys. J.* – 2001. – Vol. 553, No. 1. – P. 47–72.
- Gott J. R., Park M. G., Lee H. M. Setting Limits on q_0 from Gravitational Lensing // *Astrophys. J.* – 1987. – Vol. 338, No. 1. – P. 1–12.
- Gott J. R., Rees M. J. Astronomical constraints on a string-dominated universe // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 1987. – Vol. 227, No. 2. – P. 453–459.
- Kamionkowski M., Kosowsky A. The Cosmic Microwave Background and Particle Physics // *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* – 1999. – Vol. 49. – P. 77–123.
- Kochanek C. S. Do the Redshifts of Gravitational Lens Galaxies Rule out a Large Cosmological Constant? // *Astrophys. J.* – 1992. – Vol. 384, No. 1. – P. 1–11.
- Kochanek C. S. Is There a Cosmological Constant? // *Astrophys. J.* – 1996. Vol. 466, No. 2. – P. 638–659.
- Knop R. A., Aldering G., Amanullah R. et al. Constraints on Ω_M , Ω_{Λ} , and w from an Independent Set of 11 High-Redshift Supernovae Observed with the Hubble Space Telescope // *Astrophys. J.* – 2003. Vol. 598, No. 1. – P. 102–137.
- Knox L., Christensen N., Skordis C. The Age of the Universe and the Cosmological Constant Determined from Cosmic Microwave Background Anisotropy Measurements // *Astrophys. J.* – 2001. – Vol. 563, No. 2. – P. L95–L98.

19. Komatsu E., Dunkley J., Nolte M. R. et al. Five-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Observations: Cosmological Interpretation // *Astrophys. J. Supplement*. – 2009. – Vol. 180, No. 2. – P. 330–376.
20. Krauss L. M. The End of the Age Problem, and the Case for a Cosmological Constant Revisited // *Astrophys. J.* – 1998. – Vol. 501, No. 2. – P. 461–466.
21. Melchiorri A., Bode P., Bahcall N. A., Silk J. Cosmological Constraints from a Combined Analysis of the Cluster Mass Function and Microwave Background Anisotropies // *Astrophys. J.* – 2003. – Vol. 586, No. 1. – P. L1–L4.
22. Mitchell, J. L., Keeton, C. R., Frieman, J. A., Sheth, R. K. Improved Cosmological Constraints from Gravitational Lens Statistics // *Astrophys. J.* – 2005. – Vol. 622, No. 1. – P. 81–98.
23. Myungshin I., Griffiths R. E., Ratnatunga K. U. A Measurement of the Cosmological Constant Using Elliptical Galaxies as Strong Gravitational Lenses // *Astrophys. J.* – 1997. – Vol. 475, No. 2. – P. 457–462.
24. Nolte M. R., Wright E. L., Page L. et al. First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Observations: Dark Energy Induced Correlation with Radio Sources // *Astrophys. J.* – 2004. – Vol. 608, No. 1. – P. 10–15.
25. Perlmutter S., Gabi S., Goldhaber G. et al. Measurements of the Cosmological Parameters Ω and Λ from the First Seven Supernovae at $z \geq 0.35$ // *Astrophys. J.* – 1997. – Vol. 483, No. 2. – P. 565–581.
26. Perlmutter S., Aldering G., Goldhaber G. et al. Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae // *Astrophys. J.* – 1999. – Vol. 517, No. 2. – P. 565–586.
27. Riess A. G., Filippenko A. V., Challis P. et al. Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant // *Astron. J.* – 1998. – Vol. 116, No. 3. – P. 1009–1038.
28. Riess A. G., Strolger L.-G., Tonry J. et al. Type Ia Supernova Discoveries at $z > 1$ from the Hubble Space Telescope: Evidence for Past Deceleration and Constraints on Dark Energy Evolution // *Astrophys. J.* – 2004. – Vol. 607, No. 2. – P. 665–687.
29. Riess A. G., Strolger L.-G., Caserteno S. et al. New Hubble Space Telescope Discoveries of Type Ia Supernovae at $z \geq 1$: Narrowing Constraints on the Early Behavior of Dark Energy // *Astroph. J.* – 2007. – Vol. 659, No. 1. – P. 98–121.
30. Tonry J. L., Schmidt B. P., Barris B. et al. Cosmological Results from High- z Supernovae // *Astrophys. J.* – 2003. – Vol. 594, No. 1. – P. 1–24.

Надійшла до редколегії 13.04.09

УДК 524.7

Б. Гнатик

ДОСЛІДЖЕННЯ З АСТРОФІЗИКИ ВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ В АСТРОНОМІЧНІЙ ОБСЕРВАТОРІЇ КИЇВСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Проведено огляд досліджень в галузі астрофізики високих енергій, які здійснювались останнім часом в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Розглянуто результати дослідження спектру та поширення космічних променів надвисоких енергій в міжгалактичному та галактичному магнітних полях, астрофізичні прояви космічних струн, еволюцію та жорстке рентгенівське та гама-випромінювання залишків Наднових зір, релятивістські ударні хвилі в оболонках Гіпернових зір. Дослідження проводяться в рамках програми «Космомікрофізика» з використанням спостережних даних відкритої в 2006 р. віртуальної рентгенівської та гама-обсерваторії (проект VIRGO).

We review investigations in field of high energy astrophysics which have been made recently at the Astronomical Observatory of Taras Shevchenko Kiev National University. We consider results of investigations of ultra high energy cosmic ray spectrum and their propagation in intergalactic and galactic magnetic fields, astrophysical signatures of cosmic strings, evolution and hard X-ray and gamma-ray radiation from Supernova remnants, relativistic shock waves in envelopes of Hypernova stars. Researches are carried out within the frame of the program "Kosmomikrofizyka" ("Astroparticle physics") with use of the observational data of the Virtual Roentgen- and Gamma-ray Observatory (project VIRGO) opened in 2006.

1. Вступ. Останніми десятиліттями помітно зросла доля астрономічних досліджень в області астрофізики високих енергій. Ранні етапи еволюції Всесвіту, фізичні процеси в околі релятивістських об'єктів, прискорення та нетеплове випромінювання релятивістських частинок (космічних променів) в астрофізичних умовах, природа та астрофізичні прояви темної матерії та темної енергії – неповний перелік проблем, на вирішення яких направлені значні експериментальні (космічні місії рентгенівської та гама-астрономії XMM Newton, Chandra, INTEGRAL, FERMI, наземні черенковські телескопи Тевного діапазону H.E.S.S., VERITAS, MAGIC, детектори гравітаційних хвиль VIRGO, LISA, космічних променів AGASA, HIRES, AUGER, нейтрино IceCube та багато інших) та теоретичні зусилля. В Україні ці дослідження проводяться відповідно до Міжгалузевого координаційного плану фундаментальних досліджень у галузі космології, релятивістської астрофізики і гравітації «Космомікрофізика», затвердженого НАН України, МОН України та Київським національним університетом імені Тараса Шевченка в 2005 р. та Цільової комплексної програми «Космомікрофізика» НАН України (2007–2009 рр.)

Суттєвому підвищенню рівня досліджень в галузі астрофізики високих енергій та залученню до них студентів сприяло відкриття на фізичному факультеті Київського національного університету імені Тараса Шевченка в 2006 р. Віртуальної рентгенівської та гама-обсерваторії (VIRGO)- наукового комп'ютерного центру астрофізики високих енергій для підтримки досліджень в області космомікрофізики та використання даних космічних місій в рентгенівському та гама-діапазонах, зокрема, місії INTEGRAL (обладнання закуплено на кошти гранту Женевської обсерваторії та Центру даних місії INTEGRAL) [18]. VIRGO служить експериментальною базою досліджень з космомікрофізики, забезпечуючи науковців даними спостережень, тобто, є сучасним варіантом вирішення проблеми доступу астрономів до даних спостережень вже відпрацьованих та діючих космічних місій. В нашій роботі приведено огляд досліджень в галузі астрофізики високих енергій, які проводяться в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

2. Дослідження космічних променів надвисоких енергій. Однією з актуальних проблем астрофізики високих енергій залишається пояснення природи, механізмів прискорення та джерел космічних променів [12]. Спостережуваний енергетичний спектр космічних променів близький до степеневого і простягається до енергій понад 10^{20} eV,