



**Нобелівська премія** — найвідоміша та найпрестижніша міжнародна відзнака, присуджується за видатні наукові дослідження, революційні винаходи або крупний внесок в культуру чи розвиток суспільства.

10 грудня 2011 року, в день народження Альфреда Нобеля, у Стокгольмі й Осло відбулися урочисті церемонії нагородження лауреатів.

Король Швеції Карл XVI вручив нагороди фізикам *Солу Перлматтеру*, *Брайану Шмідту* й *Адаму Ріссу* за відкриття явища прискореного розширення Всесвіту.

За канадського медика та дослідника *Ральфа Стейнмана*, що не дожив до визнання своїх досягнень лише три дні, нагороду отримувала його дружина. Стейнман, разом з двома іншими лауреатами медичної премії *Брюсом Бойтлером* і *Жюлем Хоффманом*, вивчав механізми активації імунітету.

Нагороду в галузі хімії здобув ізраїльський учений *Даніель Шехтман* за відкриття квазікристалів.

*Томас Сарджент* і *Крістофер Сімс* із США отримали Нобелівські премії з економіки за емпіричні дослідження макропроцесів.

Літературна премія дісталася шведському поетові *Тумасу Транстрьому*.

Церемонія нагородження премією миру, за заповітом Альфреда Нобеля, відбувалася в норвезькому Осло. Лауреатами стали три жінки: президент Ліберії *Елен Джонсон-Серліф*, представниця ліберійського жіночого руху за мир *Лейма Гбові* й активістка з Ємену *Таваккул Карман*. Їм присудили премію «за ненасильницьку боротьбу за безпеку жінок і за їхнє право на участь у громадській діяльності».

Сума Нобелівської премії 2011 року в кожній з номінацій становила 10 млн шведських крон (1,1 млн євро).

Ю.В. ШТАНОВ

## ВСЕСВІТ, ЩО РОЗШИРЮЄТЬСЯ З ПРИСКОРЕННЯМ

Нобелівську премію 2011 року в галузі фізики розділили Сол Перлматтер (*Saul Perlmutter*), Брайан Шмідт (*Brian Schmidt*) і Адам Рісс (*Adam Riess*) за відкриття прискореного розширення Всесвіту за спостереженнями далеких наднових. Ця інформація епохальна для фізичної космології, оскільки в контексті загальної теорії відносності вона свідчить про наявність у природі фундаментальної компоненти — темної енергії.

Явище розширення Всесвіту було відкрито на початку 20-х рр. ХХ ст. у результаті досліджень астрофізиків і космологів Карла Віртца (*Carl Wirtz*), Кнута Люндмарка (*Knut Lundmark*), Георга Леметра (*Georges Lemaître*), Едвіна Хаббла (*Edwin Hubble*). Уперше на основі спостережень за далекими галактиками Едвін Хаббл встановив закономірність, яка тепер носить його ім'я: відстань між віддаленими галактиками зростає з часом зі швидкістю, пропорційною до цієї відстані. Швидкість космологічного розширення для Всесвіту, заповненого звичайною матерією, повинна уповільнюватися з часом завдяки всесвітньому тяжінню. Динаміку космологічного розширення можна перевірити за спостереженнями видимого блиску далеких об'єктів, якщо відома їхня власна світимість. Саме такий тест провели дві незалежні групи дослідників, одна під керівництвом Сола Перлматтера, друга — Брайана Шмідта й Адама Рісса.

Спостерігаючи за дуже яскравими надновими типу Ia (один а) на відстанях до 6 млрд світлових років, обидві групи дійшли висновку, що Всесвіт розширюється не з уповільненням, а з *прискоренням* [1].

У стандартній космологічній моделі, основаній на теорії гравітації Ейнштейна, прискорене розширення Всесвіту означає наявність у ньому особливої компоненти, що отримала назву *темної енергії*. Один з варіантів темної енергії — це так звана космологічна стала, або  $\Lambda$ -член. Ейнштейн уперше ввів її в теорію гравітації ще в 1917 р. Космологічна стала за властивостями подібна до енергії фізичного вакууму і може ототожню-

ватися з нею. Але на сьогодні достеменно невідомо, чи саме ця константа природи, чи інший матеріальний носій, середовище або поле є темною енергією. Згідно зі спостереженнями за надновими типу Ia, за анізотропією температури космічного мікрохвильового фонового (реліктового) випромінювання (СМВ), за просторовим розподілом галактик у Всесвіті, темна енергія становить близько 73% повної енергії Всесвіту, ще 23% припадає на *темну матерію*, природу якої теж не з'ясовано. Лише 4% енергії Всесвіту має форму відомої речовини, такої як звичайні атоми, з яких складаються галактики і міжгалактичний газ.

## НОБЕЛІАНТИ

**Сол Перлматтер** народився в 1959 р. у родині науковців — інженера-хіміка і молекулярного біолога, згодом професора Пенсильванського університету Данієла Перлматтера (*Daniel D. Perlmutter*) і соціального працівника, професора Університету Темпл Феліс (Фейги) Девідсон Перлматтер (*Felice (Feige) Davidson Perlmutter*). У 1981 р. з відзнакою закінчив Гарвардський університет. У 1986 р. у Каліфорнійському університеті (м. Берклі) отримав ступінь доктора філософії (PhD). Його дисертаційна робота, якою керував Річард Мюллер (*Richard Muller*), була присвячена виявленню об'єктів-кандидатів на роль Немезиди. Нині Перлматтер очолює проекти *Supernova Cosmology Project* в Національній лабораторії ім. Ернеста Орландо Лоуренса в Берклі і *SuperNova Acceleration Probe*.

**Брайан Шмідт** народився в 1967 р. у м. Міссула (штат Монтана), США. У 1985 р. закінчив середню школу Бартлетта (*Bartlett High School*) в Анкориджі на Алясці, у 1989 р. —



Сол ПЕРЛМАТТЕР



Брайан ШМІДТ



Адам РІСС

Аризонський університет, у 1993 р. — Гарвардський університет, де отримав ступінь доктора філософії. У 1993–1994 рр. працював пост-доктором у Гарвард-Смітсонівському центрі астрофізики, у 1995 р. перейшов на роботу до обсерваторії Маунт-Стромло в Австралії, де працює досі. Шмідт очолював програму пошуку наднових типу Ia, присвячену вивченню розширення Всесвіту. Його групі спільно з колективом під керівництвом Перлматтера вдалося довести наявність прискореного розширення Всесвіту. Нині Шмідт очолює проект дослідження південної півкулі неба телескопом SkyMapper.

**Адам Рісс** народився в 1969 р. у Вашингтоні, США. У 1992 р. закінчив Массачусетський технологічний інститут. Ступінь доктора філософії отримав у Гарвардському університеті в 1996 р. Його дисертаційною роботою керував Роберт Кіршнер (Robert Kirshner). Під його керівництвом Рісс провів спостереження більш ніж 20 наднових типу Ia, розробив методику корекції отриманих даних з урахуванням космічного пилу і внутрішніх неоднорідностей. Рісс отримав стипендію Міллерів у Каліфорнійському університеті, у 1999 р. перейшов у Науковий інститут космічного телескопа. З 2005 р. працює в Університеті Джонса Гопкінса. Рісс керував роботою Групи пошуку наднових з великими  $z$ , яка першою опублікувала свідчення про те, що розширення Всесвіту прискорюється. Рісс очолює дослідницьку програму з вивчення наднових з найвищими червоними зміщеннями, яка використовує Космічний телескоп Хаббла.

У 2006 р. Сол Перлматтер, Брайан Шмідт і Адам Рісс отримали премію Шоу (Shaw Prize) з астрономії в \$1 млн за відкриття прискореного розширення Всесвіту.

#### ВСЕСВІТ І ЗАГАЛЬНА ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ

Теорія гравітації Ньютона, яка чудово описує динаміку сонячної системи, на початку ХХ ст. почала суперечити принципам створеної та експериментально доведеної теорії

відносності. Видатні вчені того часу міркували над розв'язанням цієї проблеми. Найоригінальнішу і, як виявилось, цілком правильну теорію гравітації запропонував у 1915 р. Альберт Ейнштейн (Albert Einstein), назвавши її загальною теорією відносності [2]. Нова теорія відразу пояснила невелику залишкову вікову прецесію перигелію Меркурію. Через чотири роки вона дістала блискуче підтвердження в спостереженні відхилення світлових променів за проходження поля тяжіння Сонця. У 1916 р. Карл Шварцшильд (Karl Schwarzschild) отримав розв'язок рівнянь загальної теорії відносності, який описував сферично симетричне гравітаційне поле планети або зорі [3], і започаткував теорію чорних дір. Стало ясно, що нову теорію гравітації можна застосувати для опису всесвітнього тяжіння на космологічних відстанях.

У 1917 р. Ейнштейн застосував рівняння загальної теорії відносності до Всесвіту в цілому [4], зробивши два важливі припущення: 1) Всесвіт просторово однорідний за усереднення в досить великому просторовому масштабі; 2) у середньому він статичний, тобто не змінюється в часі. Перше припущення, незважаючи на тогочасну спостережну недостовірність, згодом підтвердилося й отримало статус *космологічного принципу*. Друге на той час було загальноприйнятим, зокрема, через неспостереженість помітно великих відносних швидкостей у світі зірок і туманностей. Проте, записавши рівняння своєї теорії для Всесвіту з припущеннями однорідності і статичності, Ейнштейн побачив, що вони не мають розв'язків. Вихід швидко знайшовся, оскільки до рівнянь побудованої теорії гравітації, не порушуючи принципів теорії відносності, можна додати особливий член, що містить космологічну сталу  $\Lambda$  — компоненту Всесвіту зі сталою густиною енергії. Урахувавши цей член у рівняннях загальної теорії відносності, Ейнштейн отримав статичний однорідний розв'язок, з якого однозначно випливало, що простір Всесвіту мав бути замкнутим і геометрично відповідати тривимірній сфері. Величина космологічної сталої в такому Всесвіті мусила точно відповідати густині звичайної матерії.

У 1922 р. російський математик, фізик і геофізик Олександр Олександрович Фрідман виявив, що статичний розв'язок Ейнштейна насправді нестійкий [5]. Найменше відхилення густини матерії від критичного значення, залежно від знаку цього відхилення, приведе або до розширення, або до стискування Всесвіту. Спочатку Ейнштейн критично поставився до цих результатів, але через рік визнав їхню справедливість, хоч ідея Всесвіту, що розширюється або стискається, була йому не дуже до вподоби. У 1924 р. Фрідман представив повну систему космологічних рівнянь, які описують Всесвіт, що розширюється [6]. У 1927 р. теорію такого Всесвіту незалежно розробив бельгійський вчений і католицький священик Георг Леметр [7], який, до того ж, теоретично передбачив закон Хаббла. Ці результати залишались поза увагою широкої наукової спільноти до початку 30-х рр., коли британський астрофізик Артур Еддінгтон (Arthur Eddington) звернув на них увагу Лондонського королівського товариства.

На початку ХХ ст. космологічний принцип не відповідав загальноприйнятим уявленням про будову Всесвіту. Була поширеною точка зору, за якою Всесвіт складається з однієї зоряної системи — Чумацького Шляху, а численні туманності — це газові хмари в її периферійних областях<sup>1</sup>. У 1912 р. американський астроном Весто Слайфер (Vesto Slipher) започаткував вимірювання зміщення спектральних ліній найяскравіших з цих туманностей. (Зміщення в спектрі об'єкта залежить від його радіальної швидкості відносно спостерігача — так званий ефект Доплера.) Слайфер помітив, що майже всі туманності віддаляються від нас зі швидкостями, що перевищують другу космічну швидкість для нашої галактики. Ці відкриття стимулювали дискусію про природу і просторове

<sup>1</sup> Утім існувала гіпотеза про позагалактичну природу туманностей, які можуть бути далекими зоряними скупченнями, подібними до Чумацького Шляху; див. цікавий курс Анрі Пуанкаре (Henri Poincaré) з оглядом космогонічних гіпотез станом на 1911 рік [8].

положення спіральних туманностей. Питання було остаточно з'ясовано в 20-ті рр. після спостережень Едвіна Хаббла на 100-дюймовому телескопі, розташованому на горі Вільсона. Хабблу вдалося розрізнити окремі зорі в туманності Андромеди й інших спіральних туманностях. Деякі з цих зірок виявилися цефеїдами – особливими зорями, що змінюють свій блиск з періодом, однозначно залежним від їхньої світимості (їх ще називають змінними зорями). Таку закономірність відкрила в 1912 р. американський астроном Генрієтта Левітт (Henrietta Leavitt) на основі спостережень за близькими цефеїдами в нашій галактиці. Вона дає змогу визначити абсолютну світимість цефеїд у далеких туманностях за періодом зміни блиску, а з допомогою закону обернених квадратів для видимого блиску можна отримати відстань до них. На основі цього методу Хаббл з'ясував, що туманності являють собою віддалені позагалактичні зоряні системи [9].

Розташувавши результати власних спостережень разом з результатами спостережень інших астрономів на площині «відстань до об'єкта–швидкість його віддалення», Хаббл встановив згаданий приблизний закон пропорційності між швидкістю віддалення туманності і відстанню до неї, що тепер носить його ім'я [10]. Цей досить несподіваний для його відкривачів результат був вирішальним для прийняття ідеї Всесвіту, що розширюється, у якій з того часу не сумнівався і сам Ейнштейн. Саме тоді, як розповідають, в одному з листів великий учений назвав свої попередні прагнення до побудови теорії стаціонарного Всесвіту і викликане ними введення космологічного члена в теорію гравітації своєю «найбільшою помилкою». На якийсь час про космологічний член забули.

Результати спостережень Хаббла й інших астрономів привели також до визнання ідеї однорідного й ізотропного Всесвіту, яка отримала статус космологічного принципу. Однорідність та ізотропія означають, що Всесвіт у середньому має виглядати однаково в усіх напрямках і для всіх спостерігачів, що живуть в одну космологічну епоху. Таким

чином, принцип Коперніка про те, що ми не займаємо виділеного положення в нашій зоряній системі, було узагальнено на весь видимий Всесвіт. З 30-х рр. справедливості космологічного принципу послідовно підтверджували спостереження за просторовим розподілом галактик. Він став незаперечним після відкриття в 1964 р. космічного мікрохвильового фонового (реліктового) випромінювання. За це американцям Арно Пензіасу (Arno Penzias) і Роберту Вільсону (Robert Wilson) в 1978 р. було присуджено Нобелівську премію. Сучасні спостереження залежності температури реліктового випромінювання від напрямку свідчать про високу ізотропію раннього Всесвіту на відносному рівні  $10^{-5}$ . За ці спостереження, а також за точне вимірювання спектру реліктового випромінювання Нобелівську премію в 2006 р. розділили американці Джон Мезер (John Mather) і Джордж Смут (George Smoot).

#### ОДНОРІДНИЙ ТА ІЗОТРОПНИЙ ВСЕСВІТ

Як показав у 1934 р. видатний британський астрофізик і математик Едвард Мілн (Edward Milne), рівняння, що описують динаміку розширення однорідного й ізотропного Всесвіту, заповненого нерелятивістською речовиною, можна отримати з теорії Ньютона. Це цілком закономірно, адже загальна теорія відносності містить теорію гравітації Ньютона як граничний випадок і тому зводиться до неї в границі невеликих відстаней та швидкостей.

Нехай у будь-який момент часу  $t$  в околі точки простору, прийнятої за початок системи відліку, центри окремих галактик мають радіус-вектори  $\mathbf{r}_i(t)$ , де  $i$  позначає номер галактики. Розподіл галактик зберігатиме однорідність та ізотропію в середньому лише, якщо ці радіус-вектори змінюватимуться в часі пропорційно, звідки маємо  $\mathbf{r}_i(t) = a(t) \mathbf{r}_i^0$ , де  $\mathbf{r}_i^0$  – фіксовані радіус-вектори. Універсальна функція  $a(t)$  називається масштабним фактором і відіграє важливу роль у космології. Її можна нормувати на одиницю в

сучасну космологічну епоху:  $a(t_0) = 1$ , тоді  $\mathbf{r}_i^0$  матимуть сенс сучасних радіус-векторів. Закон Хаббла негайно впливає з космологічного принципу. Справді, диференціюючи рівняння  $\mathbf{r}_i(t) = a(t) \mathbf{r}_i^0$  по змінній часу, отримуємо,  $v_i - v_j \equiv \dot{\mathbf{r}}_i - \dot{\mathbf{r}}_j = H(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)$ , де  $-H(t) \equiv \dot{a}(t)/a(t)$  параметр Хаббла. Його сучасне значення  $H(t_0) = H_0$  — стала Хаббла — за даними спостережень становить приблизно 72 км/сек на мегапарсек в одиницях, прийнятих в астрономії. Іншими словами, галактики на відстані в один мегапарсек<sup>2</sup> завдяки космологічному розширенню віддаляються одна від одної з середньою швидкістю 72 км/сек. У звичайних одиницях маємо  $H_0 = 2,3 \cdot 10^{-18} \text{ сек}^{-1}$ .

Космологічний закон червоного зміщення можна отримати розглядаючи поширення світла від однієї галактики до іншої. Нехай частота світла, спостереженого в момент часу  $t$  у точці його прольоту, —  $\omega$ . У момент  $t + dt$  світло пролітає галактику, розташовану на відстані  $dr = c dt$  від попередньої, і рухається з відносною швидкістю  $dv = H dr = H c dt$  завдяки космологічному розширенню. Через ефект Доплера спостережна частота світла зменшиться на величину  $d\omega = -\omega dv / c = -\omega H dt = -\omega da / a$ . Інтегруючи це диференціальне рівняння, отримуємо закон  $\omega a = \text{const}$ . Червоне зміщення  $z$  спектральних ліній для сучасного спостерігача визначається масштабним фактором на момент  $t$  випромінювання світла:

$$1 + z = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{1}{a(t)}. \quad (1)$$

Ця формула неявно виражає космологічний час  $t$  через відповідне червоне зміщення  $z$ , причому сучасній епосі відповідає значення  $z = 0$ .

Закон космологічного розширення, тобто закон еволюції масштабного фактора  $a(t)$ , — одне з центральних питань космології. Його можна отримати так. Розгляньмо сферу досить малу для того, щоб застосувати до неї ньютонівське наближення. Взаємний рух

галактик у цій сфері відбувається незалежно від зовнішнього оточення в силу сферичної симетрії<sup>3</sup>. Тоді прискорення галактик на границі сфери визначається законом Ньютона і масою речовини, що заповнює сферу, звідки елементарно випливає рівняння:

$$\frac{\ddot{a}(t)}{a(t)} = -\frac{4\pi G}{3} \rho(t), \quad (2)$$

де  $\rho(t)$  середня просторова густина маси, яка, в силу космологічного принципу, залежить лише від часу. З рівняння видно, що Всесвіт, у якому домінує нерелятивістська речовина, розширюється з уповільненням, тобто  $\ddot{a}(t) < 0$ .

Загальна теорія відносності дещо корегує рівняння (2). По-перше, гравітаційного характеру набуває не лише густина маси, а й тиск речовини, тому  $\rho$  потрібно замінити на  $\rho + 3p/c^2$ , де  $p$  тиск, а  $c$  — швидкість світла. По-друге, потрібно врахувати можливу наявність космологічної сталої  $\Lambda$ , про яку вже йшлося. Точне рівняння загальної теорії відносності виглядатиме:

$$\frac{\ddot{a}(t)}{a(t)} = -\frac{4\pi G}{3} \left[ \rho(t) + \frac{3p(t)}{c^2} \right] + \frac{\Lambda}{3}. \quad (3)$$

Рівняння доповнює закон збереження енергії речовини у Всесвіті. Його можна просто отримати з умови, що прирівнює зміну енергії всередині об'єму, що розширюється разом з речовиною, до роботи, яку ця речовина виконує над оточенням завдяки тиску:  $d(c^2 \rho a^3) + pd(a^3) = 0$ , або  $\rho + 3H(\rho + p/c^2) = 0$ . З урахуванням цього закону рівняння (3) можна проінтегрувати, помноживши його на  $a\dot{a}$ , у результаті чого отримуємо інше важливе космологічне рівняння:

$$H^2(t) \pm \frac{c^2}{R^2 a^2(t)} = \frac{8\pi G}{3} \rho(t) + \frac{\Lambda}{3}, \quad (4)$$

де  $R$  — стала інтегрування розмірності довжини, яка має сенс сучасного радіусу

<sup>2</sup> Один парсек становить близько 3,26 світлових років, або  $3 \cdot 10^{16}$  м.

<sup>3</sup> Завдяки закону обернених квадратів сферично симетричний зовнішній розподіл речовини не створює гравітаційного поля всередині сфери. Аналогічна теорема має місце і в загальній теорії відносності.

просторової кривини Всесвіту і може бути додатною або від'ємною залежно від знака в (4). Якщо густину матерії Всесвіту  $\rho$  становить нерелятивістська речовина, подібна до зірок і газу, тиском якої можна знехтувати, то з закону збереження енергії маємо  $\rho(t) = \rho_0 a^{-3}(t)$ , і, зважаючи на (1), рівняння можна переписати, перейшовши від змінної часу до червоного зміщення:

$$H^2(z) = H_0^2 [\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_R(1+z)^3 + \Omega_\Lambda], \quad (5)$$

де введено стандартні позначення для загальноприйнятих у космології безрозмірних «параметрів  $\Omega$ »:

$$\Omega_m = \frac{8\pi G\rho_0}{3H_0^2}, \Omega_R = \mp \frac{c^2}{R^2 H_0^2}, \Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3H_0^2}. \quad (6)$$

Лише два з цих параметрів незалежні, оскільки з (5), узятого в момент  $z = 0$ , видно, що вони задовольняють зв'язок  $\Omega_m + \Omega_R + \Omega_\Lambda = 1$ . Для Всесвіту, заповненого нерелятивістською речовиною, рівність (3) у сучасну епоху ( $t = t_0$ ) теж можна виразити через параметри  $\Omega$  і так званий безрозмірний параметр уповільнення  $q_0 = -\ddot{a}_0/a_0 H_0$ :

$$q_0 = \frac{1}{2}\Omega_m - \Omega_\Lambda. \quad (7)$$

Рівняння (4)–(7) описують так звану модель  $\Lambda$ CDM ( $\Lambda$  + Cold Dark Matter – космологічна стала і холодна темна матерія) – на сьогодні стандартну в космології.

Червоне зміщення спектральних ліній спостережене (на відміну від відстані до об'єкта або від моменту часу, коли він випромінює світло) і тому широко використовується в космології. Для характеристики відстані до світного об'єкта вводиться так звана *фотометрична відстань*  $d_L$  за означенням:

$$F = \frac{L}{4\pi d_L^2}, \quad (8)$$

де  $L$  – повна світимість об'єкта, а  $F$  – потік випромінювання від нього.

В евклідовому просторі з нерухомими галактиками фотометрична відстань – це звичайна евклідова відстань до об'єкта. У Все-

світі, що розширюється, це вже не так, і фотометрична відстань стає функцією червоного зміщення світного об'єкта. Цю функцію неважко знайти для евклідової просторової геометрії шляхом інтегрування вздовж променя світла з урахуванням ефекту Доплера:

$$d_L(z) = c(1+z) \int_0^z \frac{dz'}{H(z')}, \quad (9)$$

де  $H(z)$  – залежність параметра Хаббла від червоного зміщення, що в моделі з нерелятивістською речовиною дано в (5). Як бачимо, фотометрична відстань тут залежить від функції  $H(z)$ , яку визначає закон еволюції масштабного фактора  $a(t)$ . У випадку неевклідової просторової геометрії формула має вигляд:

$$d_L(z) = (1+z)RS \left( \frac{c}{R} \int_0^z \frac{dz'}{H(z')} \right), \quad (10)$$

де функція  $S(x) = \sin x$  у випадку додатної кривини простору (знак  $+$  у (4)) і  $S(x) = \sinh x$  у випадку від'ємної (знак  $-$ ). Фотометричну відстань можна розкласти по  $z$  при невеликому червоному зміщенні  $z < 1$ :

$$d_L(z) = \frac{c}{H_0} \left( z + \frac{1-q_0}{2} z^2 + \dots \right). \quad (11)$$

Як бачимо, її поведінка залежить від параметра уповільнення  $q_0$ , який у моделі  $\Lambda$ CDM виражено в (7).

Як впливає з (9)–(11), фотометрична відстань як функція червоного зміщення  $d_L(z)$  вельми зручна для визначення космологічної еволюції параметра Хаббла  $H(z)$ , а отже, і масштабного фактора  $a(t)$ . Згідно з (5), це дає змогу встановити характер матеріального складу Всесвіту. Але для використання (8) з метою вимірювання фотометричної відстані, очевидно, потрібні об'єкти з відомою власною світимістю  $L$ . Такі об'єкти в космології називають *стандартними свічками*. Одним з важливих досягнень спостережної космології останніх двох десятиліть було виділення певного класу об'єктів як стандартних свічок і проведення космологічного тесту на основі (8)–(10). Саме за ці

дослідження і було присуджено Нобелівську премію 2011 року.

#### НАДНОВІ ЯК СТАНДАРТНІ СВІЧКИ

Добре відомий (і вже згаданий) клас стандартних свічок — це змінні зорі (цефеїди), які сьогодні можна розгледіти на відстані до десятків мільйонів світлових років. Однак для встановлення закону розширення Всесвіту на помітному інтервалі часу потрібні стандартні об'єкти, видимі на відстанях у сотні разів більших. Ще в 1938 р. Волтер Бааде (Walter Baade) зазначив, що такими об'єктами можуть бути наднові зорі. Світимість їхніх спалахів на кілька тижнів здатна перевищити світимість цілої галактики, що робить їх видимими з дуже далеких відстаней. Наднові, що їх в останні десятиліття розглядають як стандартні свічки [11], належать до типу Ia.

За сучасними уявленнями, наднові типу Ia спалахують у подвійних зоряних системах, коли невеликий білий карлик, що поступово поглинає речовину зі свого компаньйона, наближається до критичної границі близько 1,4 маси Сонця (так звана границя Чандрасекара, за її теоретичне встановлення цей видатний учений індійського походження отримав Нобелівську премію 1983 року). Це максимальна маса зорі, підтримувана в рівновазі тиском виродженого електронного газу. Після її досягнення рівновага порушується, відбувається термоядерний вибух, у якому за декілька секунд вивільнюється величезна кількість енергії (порядку  $10^{44}$  джоулів). Еволюцію світимості такої наднової, або *криву блиску*, можна спостерігати кілька тижнів. Типова абсолютна зоряна величина таких наднових становить  $-19,3$ , що відповідає світимості в п'ять мільярдів разів більшій за сонячну. Наднові типу Ia ідентифікують за особливими спектральними рисами — відсутністю ліній водню та наявністю лінії поглинання кремнію. Їхні спектри і криві блиску напрочуд однакові, що свідчить про типове походження й однакову внутрішню світимість. Невеликий розкид

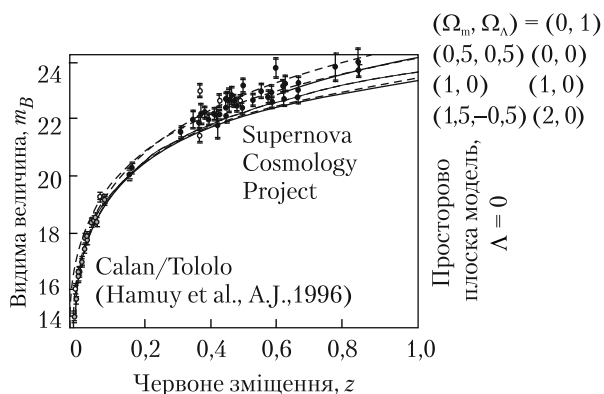
між цими параметрами в різних наднових можна врахувати на основі кореляції між спектром і кривою блиску.

Однорідність спектрів і світимості наднових типу Ia робить їх зручними стандартними свічками. Оскільки пік світимості наднової настає невдовзі після спалаху, її потрібно помітити якомога раніше, щоб провести необхідні вимірювання кривої блиску. Наднові типу Ia досить рідкісні; в окремій галактиці вони спалахують лиш один-два рази на тисячоліття. Але для статистично значимого визначення космологічної еволюції необхідно багато таких спостережень, у тому числі на великих космологічних відстанях (з червоними зміщеннями  $z$ , що наближаються до одиниці).

Перші систематичні пошуки наднових типу Ia з великими червоними зміщеннями проводила наприкінці 80-х рр. дансько-британська колаборація [12] на півтораметровому телескопі в Ла Силья, Чилі. За два роки спостережень було знайдено дві наднові, одна з яких мала потрібний тип Ia і досить велике червоне зміщення  $z = 0,31$ . Ці важливі дослідження показали принципову спроможність програми пошуку наднових.

Космологічний проект наднових (Supernova Cosmology Project, SCP) розпочався в 1988 р. під керівництвом Сола Перлматтера з Національної лабораторії в Берклі і мав за мету визначити закон космологічного розширення описаним методом з використанням наднових типу Ia як стандартних свічок. Для ефективного пошуку наднових Перлматтер з колегами виробили стратегію, яку назвали «наднова на замовлення» (Supernova on Demand). За допомогою 4-метрового телескопа, облаштованого сучасними приладами з зарядовим зв'язком (charge-coupled device), дві-три ночі відразу після нового (затемненого) місяця спостерігали за тисячами галактик. Після спостереження за тими самими областями небесної сфери через три тижні і порівняння відповідних зображень виявляли кілька наднових на підйомі кривої блиску, які надалі спостерігали в піку світимості. Оскільки таке знаходження наднових практично гарантоване, заздалегідь планувався





**Рис. 1.** Діаграма Хаббла для 42 далеких наднових типу Ia, досліджених групою SCP, і 18 відносно близьких наднових за результатами Групи огляду наднових Калан/Тололо. Суцільні криві відповідають космологічним моделям з  $\Lambda = 0$  і різними значеннями  $\Omega_m$ . Пунктирні криві відповідають моделям з евклідовою геометрією простору (для яких  $R = \infty$  у (4), що задовольняють умову  $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$

час для спостережень найбільшими телескопами світу в Чилі, на Гаваях і на Ла-Пальмі. Перші далекі наднові було досліджено в 1992 р., у 1994 р. їх уже нараховували сім, а перші результати спостережень опублікували в 1995 році [13].

Одночасно криві блиску декількох близьких наднових типу Ia досліджувала Група огляду наднових Калан/Тололо (Calan/Tololo Supernova Survey) [14]. Дані цих досліджень були суттєвими для калібрування наднових і перевірки їхньої стандартності. Встановивши і використавши зв'язок між яскравістю надрової в піку і часом спадання кривої блиску (яскравіші наднові еволюціонують повільніше), було істотно уточнено власну світимість окремих наднових за часом спадання кривої блиску.

Вражені успіхом стратегії «наднова на замовлення», Брайан Шмідт з Обсерваторії Маунт-Стромло в Австралії та Ніколас Санцефф (Nicholas Suntzeff) з Обсерваторії Серро Тололо в Чилі створили в 1994 р. незалежну колаборацію — Групу пошуку наднових з великими  $z$  (High- $z$  Supernova Search Team, HZT). У наступні роки HZT під керівництвом Брайана Шмідта паралельно з Перлматтеро-

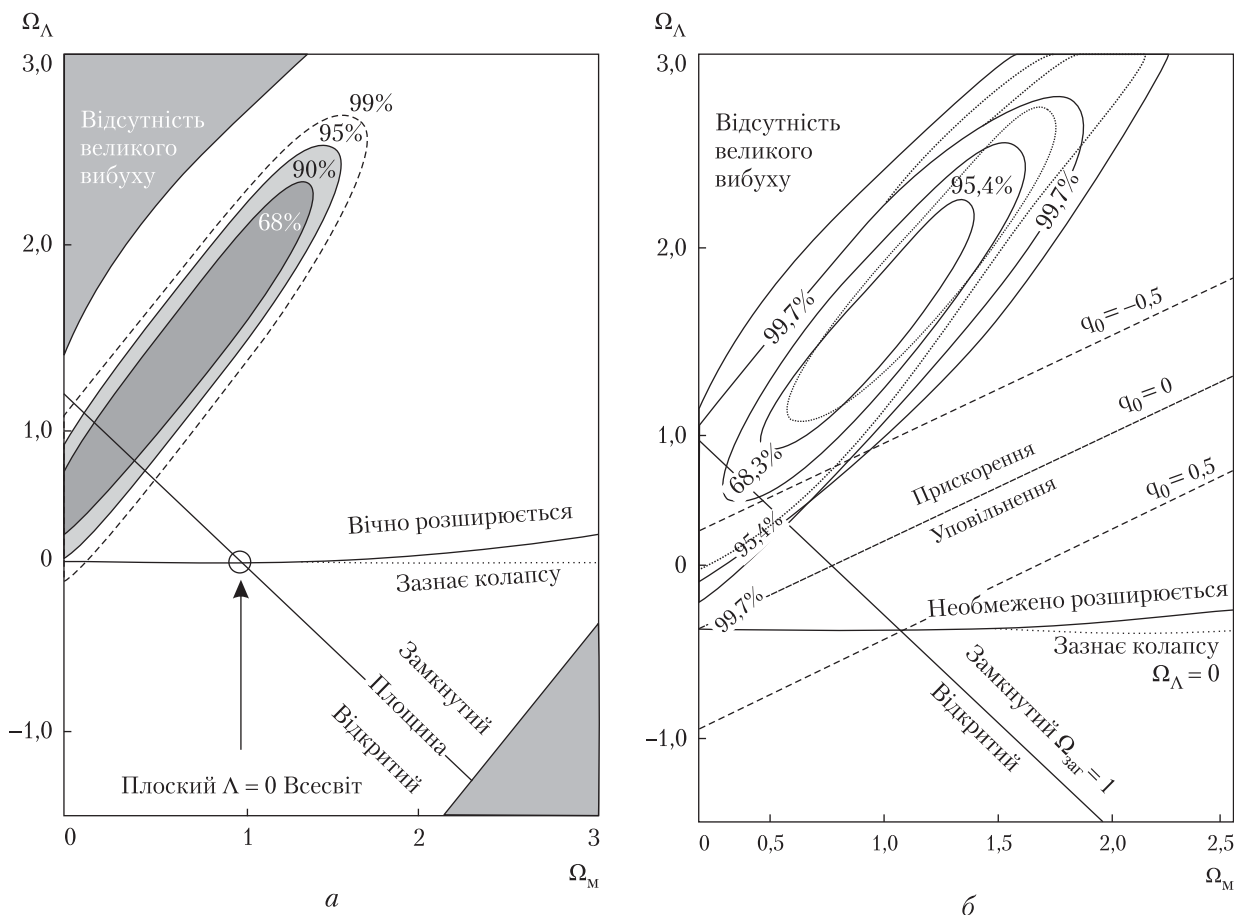
вою групою SCP незалежно шукала наднові, іноді на тих самих телескопах. Обидві групи обрали високоефективні стратегії, знайшовши багато наднових на стадії зростання блиску, що допомогло зробити необхідні фотометричні і спектроскопічні виміри.

На початку 1998 р. обидві групи обнародували результати, що попередньо свідчили про розширення Всесвіту з *прискоренням*. Дві ключові статті [14, 15], з яких випливав цей несподіваний висновок, було представлено тоді ж. Стаття групи HZT містила аналіз 16 наднових типу Ia. В основному його зробив Адам Рісс, на той час пост-доктор Каліфорнійського університету в Берклі, а стаття групи SCP ґрунтувалась на розгляді 42 наднових цього типу. Те, що обидві групи незалежно дійшли однакових висновків, було дуже важливо для прийняття їхніх результатів науковою спільнотою.

#### ПРИСКОРЕНЕ РОЗШИРЕННЯ ВСЕСВІТУ

На рис. 1 показано результати за надновими, взяті з [16]. Точки зображують окремі наднові на графіку «червоне зміщення  $z$ –видима величина  $m_B$ ». Видима величина пов'язана зі світимістю  $F$ , а отже, з фотометричною відстанню  $d_L$  (8), з логарифмічним законом  $m_L = -2,5 \ln F + \text{const} = 5 \ln d_L - 2,5 \ln L + \text{const}$ , з деякою умовною константою нормування.

Чим більша видима величина, тим менш яскравий об'єкт. Величина червоного зміщення  $z = 1$  відповідає близько восьми мільярдам світлових років шляху світла від надрової. Дані за надновими порівнюють з рядом космологічних моделей, що відрізняються значеннями параметрів  $\Omega$ , визначених у (6). На червоних зміщеннях  $z > 0,1$ , тобто відстанях більших за мільярд світлових років, космологічні передбачення для різних моделей розходяться. Результати аналізу параметричного простору моделі обома групами дослідників показано на рис. 2. Вони свідчать, що модель  $\Lambda$ CDM з нульовим космологічним членом, або  $\Omega_\Lambda = 0$ , виключена з великою достовірністю. З порівняння з да-

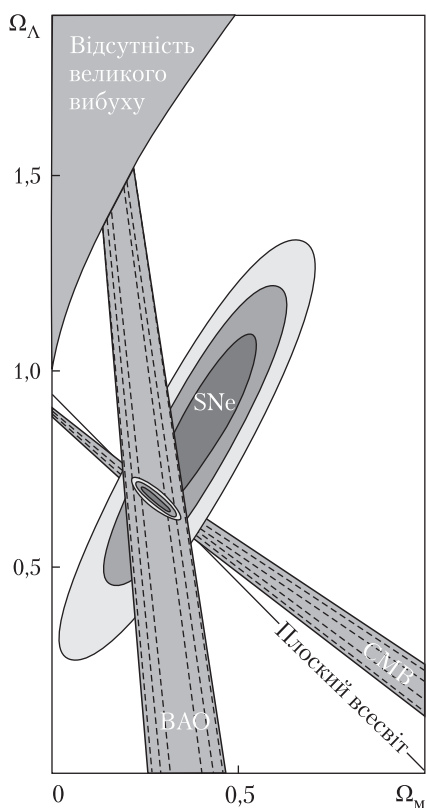


**Рис. 2.** Результати тестування космологічних моделей з довільними параметрами  $\Omega_m$  і  $\Omega_\Lambda$  групою SCP [16] (а) і групою HZT [15] (б). Показано границю  $q_0 = 0$  між моделями, що розширюються з уповільненням і з прискоренням. Видно, що прискорене розширення Всесвіту встановлено на великому рівні достовірності

ними спостережень впливає, що параметр уповільнення  $q_0$  від'ємний, а розширення в сучасну епоху відбувається з прискоренням.

Уважно подивившись на точки і графіки рис. 1, можна помітити, що висновок про наявність ненульової космологічної сталої, а отже, про прискорене розширення Всесвіту виникає завдяки тому, що далекі наднові (на великих  $z$ ) виглядають менш яскравими, ніж очікують у Всесвіті без космологічної сталої. З цього приводу виникає ряд законних запитань. Можливо, світло від далеких наднових просто поглинається космічним пилом? Можливо, далекі наднові, спостережені в епоху, коли Всесвіт був на мільярди років молодшим, мають дещо інші властивості, ніж близькі наднові того ж типу?

Обидві групи ретельно проаналізували такого роду можливості, дійшовши висновку, що ці обставини не мають вирішального впливу і самі по собі не можуть пояснити дані спостережень. Подальші дослідження наднових типу Ia підтвердили ідеї піонерських робіт [17]. Крім того, висновок про прискорене розширення Всесвіту підтвердили за останнє десятиліття прецизійні вимірювання анізотропії температури реліктового випромінювання і вивчення галактичного скупчення. Сукупні результати цих досліджень представлено на взятому з [18] рис. 3, де видно їх взаємне узгодження. Звідси походять найвірогідніші значення космологічних параметрів  $\Omega_m = 0,27$ ,  $\Omega_\Lambda = 0,73$ .



**Рис. 3.** Комбіновані дані тестування космологічних моделей з довільними параметрами  $\Omega_m$  і  $\Omega_\Lambda$  щодо наднових типу Ia (SNe) за спостереженням космічного мікрохвильового фонового (реліктового) випромінювання (СМВ) і за кореляціями в просторовому розподілі галактик (баріонні акустичні осциляції – BAO)

Вони означають, що близько 73% енергії у Всесвіті припадає на космологічну сталу (або *темну енергію*, див. нижче), а близько 27% – на *темну матерію*.

Предмет темної матерії виходить за межі статті, тут достатньо лише зазначити, що, за сучасними уявленнями, вона в гравітаційному плані поводить себе цілком подібно до звичайної матерії, хоча й складається з частинок невідомої природи.

### ЗАГАДКОВА ТЕМНА ЕНЕРГІЯ

Згідно з (3), прискорене розширення Всесвіту, тобто умова  $\ddot{a}(t) > 0$ , можливе, якщо теорія містить додатну космологічну сталу  $\Lambda$  або якщо якась компонента речовини Всесвіту має достатньо від’ємний тиск  $p$ ,

так що виконується умова  $\rho + 3p < 0$ . Згідно з (3), це створює свого роду ефект антигравітації, який і приводить до прискореного розширення Всесвіту.

Космологічна стала  $\Lambda$  має розмірність квадрату оберненого часу, і з (6) за визначеними величинами  $\Omega_\Lambda = 0,73$  і  $H_0 = 2,3 \cdot 10^{-18} \text{ сек}^{-1}$  маємо  $\Lambda = (3 \cdot 10^{17} \text{ сек})^{-2}$ , що можна також виразити в одиницях довжини з використанням іншої фундаментальної сталої – швидкості світла:  $\Lambda/c^2 = (8,8 \cdot 10^{25} \text{ м})^{-2}$ . Питання про походження таких великих фундаментальних сталих часу або довжини відкрите.

Космологічну сталу в рівняннях Ейнштейна, а отже, і Фрідмана можна інтерпретувати як внесок від енергії *фізичного вакууму*. З умови локальної лоренц-інваріантності фізичного вакууму впливає співвідношення між густиною його енергії і тиском:  $p_v = -\rho_v c^2$ . І густина енергії, і тиск фізичного вакууму залишаються сталими у просторі і часі (це впливає з закону збереження енергії) і задовольняють умову, необхідну для космологічного прискорення:  $\rho_v + 3p_v/c^2 = -2\rho_v < 0$ , якщо  $\rho_v > 0$ . Згідно з (3) або (4), космологічна стала і густина маси-енергії фізичного вакууму пов’язані співвідношенням  $\Lambda = 8\pi G\rho_v$ . З попередніх космологічних оцінок неважко отримати  $\rho_v = \Lambda/8\pi G \approx 10^{-29} \text{ г/см}^3$ . Сучасна теорія не спроможна пояснити таке значення вакуумної густини в теорії гравітації Ейнштейна. З фундаментальних сталих – гравітаційної сталої  $G$ , сталої Планка  $\hbar$  і швидкості світла  $c$  можна побудувати фундаментальну величину потрібної розмірності  $r_f + c^5/G^2\hbar = 5 \cdot 10^{93} \text{ г/см}^3$ , яка, проте, перевищує спостережну величину на 122 порядки.

Пов’язання фундаментальної густини  $\rho_f$  зі спостережною  $\rho_v$  обговорюють і далі, у тому числі українські науковці. Так, Петро Іванович Фомін, який нещодавно пішов з життя, свого часу висловив гіпотезу про перебудову квантового фізичного вакууму завдяки гравітаційній взаємодії [19], яка могла би понизити фундаментальну густину маси  $\rho_f$ , наближаючи її до спостережного значення  $\rho_v$ . Природа і параметри енергії вакууму в

теоріях з додатковими вимірами простору досліджувала група одеських науковців під керівництвом Олександра Івановича Жука [20], а механізм ефективного пониження енергії вакууму в таких теоріях — ваш покірний слуга. Пошук у цьому напрямку триває, і, без сумніву, його успіх буде пов'язаний з відкриттям досі невідомих фундаментальних законів природи.

Як згадано на початку розділу, роль темної енергії, відповідальної за прискорене розширення Всесвіту, могла би відігравати не енергія вакууму чи космологічна стала, а якесь невідоме середовище з від'ємним ефективним тиском, що задовольняє нерівність  $\rho + 3p < 0$ . Такого типу динамічне середовище може бути особливим скалярним полем, і багато теоретичних праць присвячено дослідженням у цьому напрямі. В Україні такі моделі розвиває і досліджує група львівських теоретиків-космологів під керівництвом Богдана Степановича Новосядлого [21]. Темна енергія в цих моделях цікава тим, що її густина не стала, а повільно зменшується з часом. Еволюціонує темна енергія і в моделі простору-часу з додатковим виміром, яку вивчав автор з колегами [22]. Від аналогів її відрізняє деяке зростання ефективної густини темної енергії. Еволюцію темної енергії можна в принципі розрізнити за спостереженнями наднових типу Ia і динаміки кластеризації галактик, і це одне з головних завдань міжнародних космологічних проектів, таких як запропонований до розгляду проект SuperNova Acceleration Probe (SNAP) — тестування космологічного прискорення за надновими, що спостерігатимуться за допомогою спеціальної космічної обсерваторії<sup>4</sup>.

#### ВІДКРИТІ ПИТАННЯ

В аналізі даних, отриманих за надновими, як і в цій статті, розглянуто ідеально однорідний та ізотропний Всесвіт, до якого застосовні динамічні рівняння (3), (4). Але

реальний Всесвіт неоднорідний; у ньому спостерігаються широка ієрархія галактик і галактичних скупчень, просторові пустоти, вільні від галактик, і при цьому є всі підстави вважати, що невидима темна матерія також розподілена неоднорідно й ієрархічно. Це породжує два важливі питання стосовно описаного в цій статті результату. По-перше, чи справедливі закони (3) і (4) у такому Всесвіті і чи не приведуть неоднорідності просторового розподілу матерії до додаткових ефектів на динаміку загального розширення Всесвіту, які могли б імітувати ефект від космологічного члена? По-друге, у неоднорідному ієрархічному Всесвіті пучки світлових променів від далеких наднових відхиляються в локальних гравітаційних полях, у результаті чого більшість з них знає *негативного* гравітаційного лінзування, тобто ефективного послаблення інтенсивності. Наскільки вагомий цей ефект, чи не впливає він на інтерпретацію даних яскравості далеких наднових?

Перше питання було предметом дослідження і дебатів в останнє десятиліття, і більшість космологів вважає, що його в цілому прояснено. Хоча матерія в пізньому Всесвіті розподілена вкрай неоднорідно, її розподіл не створює настільки великих гравітаційних полів, які могли б суттєво змінити динаміку розширення Всесвіту при усередненні. Можна сказати, що нам пощастило спостерігати Всесвіт, досить точно описаний рівняннями Фрідмана–Леметра (3), (4). Цікавий огляд цієї проблеми міститься в [23].

Друге питання складніше і поки що майже не вивчене [24]. Основні труднощі в тому, що розподіл матерії (особливо темної) на малих просторових масштабах (аж до однієї астрономічної одиниці), що відповідають розмірам світлових пучків від далеких наднових, невідомий, його теоретичні передбачення неоднозначні, головним чином, тому що невідома природа темної матерії. Утім узгодженість результатів досліджень за надновими типу Ia з кривими теоретичних моделей, які можна бачити на рис. 1, а також з результатами досліджень реліктового

<sup>4</sup><http://snap.lbl.gov>.

випромінювання і розподілу галактик (де немає такої проблеми), мабуть, означають, що ефекти гравітаційного лінзування тут також не суттєві.

\* \* \*

Дослідження далеких наднових, разом з іншими спостереженнями, зробили вирішальний внесок у космологію, встановивши точну структуру енергії Всесвіту. Несподівані результати цих досліджень породжують низку фундаментальних питань. Врешті, так і має бути в науці. Що саме відповідає за прискорення Всесвіту і за темну енергію? Якщо це енергія фізичного вакууму, то що пояснить її величину? Чи не хибно застосувати теорію гравітації, перевірену лише в масштабах сонячної системи, до величезних масштабів Всесвіту? Висвітлити ці питання можуть лише подальші спостереження і теоретичні дослідження.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. The accelerating universe. Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2011 // The Royal Swedish Academy of Sciences. — 17 p.
2. *Einstein A.* Die Feldgleichungen der Gravitation // Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin. — 1915. — S. 844–847.
3. *Schwarzschild K.* Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie // Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin. — 1916. — S. 189–196.
4. *Einstein A.* Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie // Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin. — 1917. — S. 142–152.
5. *Friedmann A.* Über die Krümmung des Raumes // Zeitschrift für Physik. — 1922. — V. 10. — S. 377–386.
6. *Friedmann A.* Über die Möglichkeiten einer Welt mit konstanter negativer Krümmung des Raumes // Zeitschrift für Physik. — 1924. — V. 21. — S. 326–332.
7. *Lemaître G.* Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques // Annales de la Société Scientifique de Bruxelles. — 1927. — V. 47. — P. 49–59.
8. *Poincaré H.* Leçons sur les Hypothèses Cosmogoniques. — Paris: Hermann, 1911. — 295 p.
9. *Hubble E.P.* Extragalactic nebulae // *Astrophys. J.* — 1926. — V. 64. — P. 321–369.
10. *Hubble E.P.* A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae // *Proc. Nat. Acad. Sci.* — 1929. — V. 15. — P. 168–173.
11. *Kowal C.T.* Absolute magnitudes of supernovae // *Astron. J.* — 1968. — V. 73. — P. 1021–1023.
12. *Norgaard-Nielsen H.U., Hansen L., Jorgensen H.E. et al.* The discovery of a type Ia supernova at redshift of 0.31 // *Nature.* — 1989. — V. 339. — P. 523–525.
13. *Perlmutter S., Pennybaker C.R., Goldhaber G. et al.* A Supernova at  $z=0,458$  and implications for measuring the cosmological deceleration // *Astrophys. J.* — 1995. — V. 440. — P. L41–44.
14. *Hamuy M., Maza J., Phillips M.M. et al.* The 1990 Calán/Tololo Supernova Search // *Astron. J.* — 1993. — V. 106. — P. 2392–2407.
15. *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. — V. 116. — P. 1009–1038.
16. *Perlmutter S., Aldering G., Goldhaber G. et al.* Measurement of  $\Omega$  and  $\Lambda$  from 42 high-redshift supernovae // *Astrophys. J.* — 1999. — V. 517. — P. 565–586.
17. *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. — V. 607. — P. 665–687.
18. *Kowalski M., Rubin D., Aldering G. et al.* Improved cosmological constraints from new, old and combined supernova datasets // *Astrophys. J.* — 2008. — V. 686. — P. 749–778.
19. *Фомин П.И.* О кристаллоподобной структуре физического вакуума на планковских расстояниях // Проблемы физической кинетики и физики твердого тела. — К.: Наук. думка, 1990. — С. 387–398.
20. *Günther U., Moniz P., Zhuk A.* Nonlinear multidimensional cosmological models with form fields: stabilization of extra dimensions and the cosmological constant problem // *Phys. Rev. D.* — 2003. — V. 68. — 044010.
21. *Novosyadlyj B., Sergijenko O., Apunevych S.* Distinguishability of scalar field models of dark energy with time variable equation of state parameter // Журнал фізичних досліджень. — 2011. — Т. 15, № 1. — 1901.
22. *Sahni V., Shtanov Yu.* Braneworld models of dark energy // *J. Cosmol. Astropart. Phys.* — 2003. — V. 3 (11). — 014.
23. *Clarkson C., Ellis G., Larena J., Umeh O.* Does the growth of structure affect our dynamical models of the universe? The averaging, backreaction and fitting problems in cosmology // *Rep. Prog. Phys.* — 2011. — V. 74. — 112901.
24. *Clarkson C., Ellis G.F.R., Faltenbacher A. et al.* (Mis-) Interpreting supernovae observations in a lumpy universe // arXiv:1109.2484 [astro-ph.CO]. — 2011.