

A satellite is shown in orbit above the Earth's surface, which is covered in white clouds. The satellite is a complex structure with various instruments and a large solar panel. It is positioned in the upper left quadrant of the image, with a black circular object hanging from a thin line below it.

І.А. Климишин

ЕЛЕМЕНТИ КОСМОЛОГІЇ

Тези лекцій

І.А. Климишин

ЕЛЕМЕНТИ КОСМОЛОГІЇ

Тези лекцій

Івано-Франківськ
«Симфонія форте»
2015

ББК 22.6
К 49

Автор висловлює щирю подяку Ю.М.Пунжину за всебічну допомогу при оформленні як графічного матеріалу, так і тексту цього посібника.

Климишин І.А.

К 49 Елементи космології / І.А. Климишин. – Івано-Франківськ : Симфонія форте. 2015. – 52 с.

Цей матеріал, як сподівається автор, буде частиною оновлюваного «Курсу загальної астрономії» (Одеса, 2010 р.), перевидання якого заплановано здійснити близьким часом. Ця ж його публікація є додатком до «Релятивістської астрономії» (Ів.-Фр., 2007 р.) та «Основ космології» (Ів.-Фр., 2014) як посібник до спецкурсу тої ж назви.

Зміст

I. СПОСТЕРЕЖНІ АСПЕКТИ КОСМОЛОГІЇ

Космологічні парадокси (4). Розширення світу галактик (6). Тести Гамова (7). Релікт як система відліку (9). Тести Сендиджа (10). Наднові як стандартні свічки (11). Суть «безплатного ланчу» Зельдовича (13). Від кварків до Суперсиметрії (16).

II. КОСМОЛОГІЧНІ МОДЕЛІ ВСЕСВІТУ

Основоположні принципи (19). У рамках класичної теорії (20). Типи моделей (22). Початкова фаза розльоту (24). Становлення релятивістської космології (25). Рівняння Айнштейна (28). Достовірність теорії (29). Космологічна стала в ЗТВ (31). Релятивістські моделі Фрідмана (32). Найвідоміші нестатичні моделі (34). Потреба фази роздування (36).

III. ТЕМИ КОСМОЛОГІЇ ПОЧАТКУ ХХІ СТ.

Флуктуації РРВ (41). Суть космомікрофізики (45). Проблема темної маси та енергії (48). Перспективи теорії струн (49).

Космологія – розділ астрономії, що вивчає найзагальніші властивості навколишнього Всесвіту (мегасвіту) в цілому. Тут передусім мають на увазі тривалість його існування (його «вічність у часі» або, навпаки, «народження T_e років тому»), його протяжність у просторі («безконечність у просторі» чи, навпаки, «обмеженість» у той чи інший спосіб, як ось, за уявленнями давніх греків, – кришталевою сферою), особливості розподілу в ньому речовини – галактик та їх скупчень – і зміни з часом відстаней між ними.

I. СПОСТЕРЕЖНІ АСПЕКТИ КОСМОЛОГІЇ

Космологічні парадокси. Для пояснення будови й особливостей розвитку мегасвіту використовують фізичні закони, встановлені в земних лабораторіях (у масштабах *макро- і мікросвіту*). Тому завжди було і є актуальним питання щодо правомірності їх екстраполяції на весь Всесвіт і на всі етапи його розвитку. Бо ж наслідком цього були **космологічні парадокси** – фотометричний, гравітаційний, а також термодинамічний (гіпотеза «теплової смерті» Всесвіту).

Фотометричний парадокс сформулював у 1744 р. Швейцарський астроном **Жан Шезо**: якби простір був нескінченний і рівномірно заповнений зорями, то небо було б сліпучо-яскраве, як Місяць у повню. **Гравітаційний парадокс** детально проаналізував у 1895 р. німецький астроном **Хуго Зелігер**. Його суть така: якщо у нескінченному просторі густина речовини не нескінченно мала, а кожні дві частинки притягуються за законом Ньютона, то сила тяжіння, що діє на будь яке тіло, могла б бути як завгодно великою. Тому й прискорення, отримані під дією цієї сили, були б нескінченно великі.

Для усунення цих парадоксів висловлювали гіпотези, за якими 1) загальна маса усіх тіл у Всесвіті скінченна, або 2) середня густина речовини у світовому просторі навіть при

нескінченно великій масі близька до нуля, або 3) закон тяжіння Ньютона є неточним. Першу і третю можливості після всебічного аналізу відкинули. Друга відображає *модель острівного Всесвіту* (запропонував її німецький учений **Йоганн Ламберт** у 1761 р.), за якою речовина розподілена у Всесвіті «ієрархічно»: системи першого порядку об'єднані в системи другого порядку і т. д., причому відстані між системами мали б істотно (орієнтовно – у десять разів) перевищувати їхні розміри. Однак з 20-х років ХХ століття стало очевидним, що і цю гіпотезу треба відкинути, оскільки в *середньому* розподіл речовини у просторі є рівномірним.

Обидва згадані тут парадокси заперечували концепцію *нескінченності простору*. Гіпотеза ж «теплової смерті» заперечувала ідею *вічності* Всесвіту. Адже якщо світ існує вічно, то в ньому вже давно настало б вирівнювання температури: тепло повинно б розподілитися між усіма тілами рівномірно і будь які процеси стали б неможливими...

Основою сучасної *релятивістської* космології є загальна теорія відносності (ЗТВ), завершена **Альбертом Айнштайном** у 1915 р. У ній немає місця ні для фотометричного, ні для гравітаційного парадоксів (перший із них усувається, якщо взяти до уваги розширення Всесвіту). Що ж стосується проблеми «рівномірного розподілу тепла», то він (з точки зору класичної фізики) начебто уже був – на ранній стадії розвитку Всесвіту. З аналізу ж даних, отриманих Космічними орбітальними обсерваторіями, зокрема «Планк» (2009–2013 рр.), доводиться визнавати, що для розуміння еволюції «раннього Всесвіту» (з урахуванням квантових ефектів) необхідні будуть зусилля ще багатьох поколінь космофізиків. Тут можна підозрівати вияви нової, ще невідомої фізики. Тому обговорення питань, що стосуються моделей Всесвіту, особливо ранніх стадій його еволюції, доводиться вести з певними пересторогами.

Розширення світу галактик. Дослідження червоного зміщення у спектрах «туманностей» – галактик було започатковане в 1912 р. американським астрономом Весто Слайфером. На 60-см телескопі з експозицією майже сім годин він сфотографував спектр "туманності Андромеди" і, використавши формулу *ефекту Доплера*, встановив, що вона рухається в бік нашої Галактики зі швидкістю 300 км/с. Невдовзі для іншої туманності із сузір'я Діви він же отримав протилежний результат: об'єкт віддаляється від нас зі швидкістю 1000 км/с.

Упродовж подальших п'яти років було досліджено близько 30 об'єктів. За винятком декількох усі вказували на "розбігання". Але для належного осмислення цього факту *червоного зміщення* в їх спектрах (цей термін запропонував у 1921 р. німецький астроном Карл Вірц) необхідно було знати відстані до них.

У 1924 р. **Едвін Габбл** виявив декілька десятків змінних зір – *цефеїд* у туманності Андромеди. Обчисливши відстань до неї, він довів, що вона насправді є такою ж, як і наша, велетенською зоряною системою. З того часу розпочався розвиток *позагалактичної астрономії*. Кажемо й так: розпочалася *третья* (після Коперника, 1543 р., і Х.Шеплі, 1918 р. – цей змістив Сонце на окраїну Галактики!) *революція в астрономії* – черговий етап звільнення від *антропоцентризму*.

Упродовж наступних п'яти років Габблом, а особливо його помічником **Мілтоном Х'юмасоном**, на найбільшому тоді 2,5-м телескопі отримано спектри 46 галактик та визначено відстані до них (найdaleша мала швидкість 3800 км/с). Це і дало змогу скласти співвідношення $v = Hr$: чим більша відстань до галактики r , тим більша її швидкість v .

Сьогодні факт *червоного зміщення* у спектрах галактик інтерпретують не як рух галактик у просторі, а як *розширення самого простору*. Аналогією тут є гумова нитка, на якій пов'язано вузлики: при розтягуванні нитки відстані між

вузликами зростають не тому, що «вони пересуваються по ній», а тому що розтягується нитка. Екстраполюючи дані спостережень у минуле, можна б сказати: T_B років тому стався *вибух*, унаслідок якого речовина галактик розлітається в усіх напрямках дотепер. Тобто триває розширення простору, тоді як кожна галактика (точніше – їхні скупчення) займає в ньому «своє» місце.

Тож уведено поняття *космічного (космологічного) часу t* , який і використовують при обговоренні проблем еволюції об'єктів у різних ділянках Всесвіту. Відлічують його від згаданого *моменту вибуху*.

Тести Гамова. Уявлення, за яким Всесвіт внаслідок *Великого Вибуху* розширюється від початкового стану надвисоких температур, сьогодні загальноприйняте. Правильність цієї теорії *гарячого Всесвіту* підтвердили два передбачення Георгія Гамова (1904 – 1968):

Тест перший: Лише за умови надвисокої температури і водночас її різкого зниження у первинній протон-нейтронній суміші відбувається синтез наявних у навколишньому світі ядер гелію: 19/20 їх кількості формується на «дозоряній стадії» і лише 1/20 – в надрах зір внаслідок перебігу там термоядерних реакцій.

За Гамовим (1946 р.), t_H років тому вся речовина галактик, перед початком розльоту, була у певному щільному стані (для неї він запозичив в Аристотеля назву – *ілем*) і температура там сягала мільярдів градусів. При розширенні цієї первинної дозоряної речовини і мали б утворюватися водень, гелій та всі інші хімічні елементи. Невдовзі однак він переконався в тому, що за цих умов з уже наявних протонів і нейтронів утворюються лише ядра гелію. Зі спостережень випливає, що гелію в природі близько 30%, водню – близько 70%, на всі ж інші хімічні елементи припадає менше 1% маси речовини. Однак ця

кількість гелію не могла утворитися внаслідок термоядерних реакцій у надрах зір: при сталій світності Галактики 10^{37} Вт упродовж $14 \cdot 10^9$ років (від початку розширення Всесвіту) унаслідок термоядерних реакцій у зорях виділилася енергія близько $4 \cdot 10^{54}$ Дж. При утворенні одного ядра гелію звільнюється енергія $2,5 \cdot 10^{-12}$ Дж. Тож за час існування Галактики, маса якої $4 \cdot 10^{41}$ кг, у ній утворилося 10^{66} ядер атомів гелію, або $7,6 \cdot 10^{39}$ кг. Таким чином, за рахунок термоядерних реакцій у Галактиці могло утворитися близько 2% гелію за масою. Отже, *основна маса гелію вже була в речовині, з якої формувалися зорі Галактики.*

Тест другий: Інформацію про бувший у минулому стан надвисокої температури зберігає досьогодні космічний мікрохвильовий фон (КМФ) – реліктове радіовипромінювання (РРВ).

Згодом (у 1950 р.) момент початку розширення Фред Хойл назвав **Великим Вибухом**: температура у Всесвіті тоді мала б сягати мільярдів градусів. Тобто, *на ранній стадії розширення Всесвіт мав би бути гарячим*, а отже, заповненим квантами високих енергій. Внаслідок розширення енергія кожного фотона зменшується. Тому, як це передбачив Гамов (1958 р.), у наш час спектральний розподіл енергії цих квантів повинен відповідати випромінюванню чорного тіла, нагрітого до температури 3 К, і шукати його треба в сантиметровому діапазоні радіохвиль.

Певні дані щодо реальності його існування отримав 1941 р. канадський учений **Ендрю Мак-Келлар**, у середині 50-х років у Пулково **Т.А. Шмаонов**, однак вони нічого не знали про теоретичні оцінки **Г. Гамова**. Тож Нобелівську премію за це відкриття (1965 р.) отримали у 1978 р. американські вчені **Арно Пензіас** і **Роберт Вільсон** (рис. 1). **Реліктовим** його назвав Й.С. Шкловський.

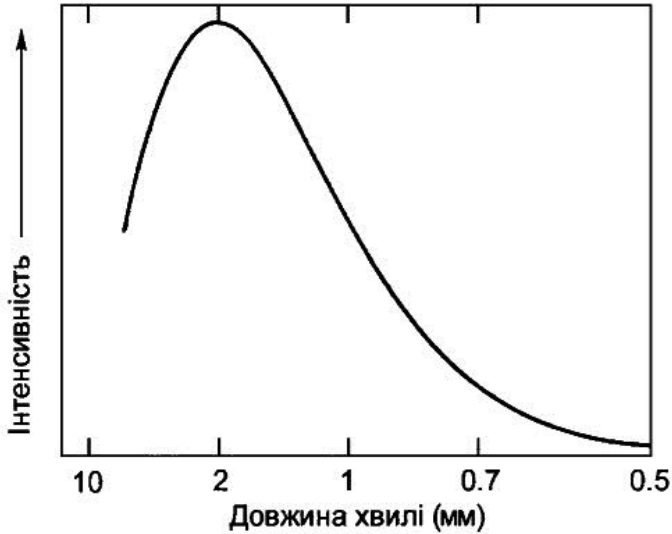


Рис.1. Загальний спектр реліктового випромінювання.

Релікт як система відліку. Отже, міжгалактичний простір заповнений квантами низької частоти. При температурі $T = 2,726 \text{ К}$ густина енергії цих квантів $u = a_R T^4 \approx 4 \cdot 10^{-20} \text{ Дж/см}^3$ ($a_R = 7,56 \cdot 10^{-22} \text{ Дж/см}^3/\text{К}^4$ – стала випромінювання). Середня енергія одного кванта $\overline{\mathcal{E}} \approx 2,7 k T \approx 10^{-22} \text{ Дж}$ ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – стала Больцмана). І середнє число квантів в одиниці об'єму $N_\gamma = u / \overline{\mathcal{E}} \approx 400 \text{ см}^{-3}$. Тим часом за сучасної середньої густини речовини у Всесвіті $\rho \approx 10^{-30} \text{ г/см}^3$ це дає концентрацію частинок $N = \rho / m_H \approx 5 \cdot 10^{-7} \text{ см}^{-3}$ ($m_H = 1,67 \cdot 10^{-24} \text{ г}$ – маса атома водню). Таким чином, у Всесвіті на кожен нуклон припадає близько 1 млрд. фотонів.

Масу, еквівалентну згаданій густині енергії u , знаходимо за формулою спеціальної теорії відносності

$$\rho_{\gamma} = \frac{u}{c^2} = \frac{aR T^4}{c^2} = 4,5 \cdot 10^{-34} \text{ г/см}^3,$$

що майже на чотири порядки менше за середню густину речовини у Всесвіті. Це означає, що в наш час реліктове випромінювання зовсім не впливає на особливості розширення Всесвіту.

Проаналізовано можливу роль реліктового радіовипромінювання як певної привілейованої системи відліку. Адже наша Галактика з її мільярдами зір, зокрема із Сонцем, занурена в море низькочастотних фотонів, які рівномірно з усіх боків пронизують місцезнаходження спостерігача. Коли ж цей спостерігач рухається зі швидкістю v , то реєструватиме надлишкову інтенсивність реліктового випромінювання у напрямі свого руху і меншу – з протилежного боку. Відповідно величина зареєстрованої ним температури становитиме

$$T(\theta) \cong T_0 \left(1 + \frac{v}{c} \cos\theta\right), \quad \text{де } \theta \text{ – кут між вектором}$$

швидкості руху спостерігача і напрямом осі радіотелескопа.

Надлишок інтенсивності, що відповідає надвишкowi температури $\Delta T/T = 0,40 + 0,56) \cdot 10^{-3}$, виявлено у напрямі на сузір'я Лева. Отже, стосовно «фону РРВ» Сонячна система рухається зі швидкістю $v \approx 350$ км/с, а центр Галактики (з урахуванням руху Сонця у протилежний бік) зі швидкістю $V \approx 600$ км/с у бік того ж сузір'я Лева.

Тести Сендиджа. Докази того, що Всесвіт взагалі розширюється, – необхідні. Бо хоча співвідношення Габбла відоме з 1929 р., дехто цей факт дотепер заперечує, а наявне червоне зміщення намагається пояснити іншими ефектами (як ось «старінням квантів» чи зміною з часом швидкості світла). Що проблема ця заслуговує серйозної уваги, підкреслив у 1997 р.

Алан Сендидж (1926–2010), пропонуючи три тести на підтвердження реальності розширення Всесвіту:

Тест перший: вимірювання *поверхневих яскравостей далеких об'єктів, конкретно – еліптичних галактик* (Сендидж здійснив його перевірку майже зразу). Було знайдено, що ці яскравості зменшуються залежно від червоного зміщення z як $(1 + z)^2$, а так і повинно бути у випадку розширення Всесвіту.

Тест другий: вимірювання *ефекту сповільнення часу* в об'єкті, який рухається зі швидкістю v відносно Землі. Його реалізовано з аналізу кривих блиску Наднових 1a, які вдалося виявити в далеких галактиках. За даними про декілька десятків цих явищ знайдено: тривалість спаду яскравості об'єкта зростає в $(1 + z)$ разів – у цілковитій згоді з теорією. Адже як впливає зі Спеціальної теорії відносності, тривалість певної події (тут – від моменту спалаху Надрової до її згасання) є найменшою у тій системі відліку, в якій вона відбувається. Це – інтервал *власного часу* $\Delta\tau$. Ми ж вимірюємо інтервал *координатного часу* Δt . Пов'язані вони співвідношенням

$$\Delta t = \Delta\tau / \sqrt{1 - \beta^2}, \quad \beta = v/c.$$

Наднові 1a (SN 1a) як стандартні свічки. SN 1a – це в основному подвійні системи, у яких один із компонентів – білий карлик. У процесі еволюції другого компонента його оболонка, розширюючись, заповнює свою *порожнину Роша* і тоді через *внутрішню точку Лагранжа* речовина перетікає в напрямку до першого, осідає на його поверхню та поступово розігрівается. І як тільки маса білого карлика досягне критичної *межі Чандрасекара* (а це 1,44 маси Сонця), він і спалахує як SN 1a.

Оскільки ж SN 1a «калібровані» за величиною своєї маси згаданою *межею Чандрасекара*, то і величина звільненої внаслідок вибуху енергії також «калібрована», *наперед відома*

для спостерігача. Тож усі Наднові типу Ia однакові за потужністю і мають однакові криві блиску. Тому SN Ia відіграють роль «стандартної свічки», тобто використовуються для визначення відстаней до далеких галактик.

Важливе є й таке: дослідник спалаху SN Ia з'ясовує три різні параметри. Перший – його яскравість, другий – зміщення ліній у спектрі і третій – тривалість перебування у фазі максимуму блиску. Бо ж тут враховується згаданий вище ефект СТВ про відносність тривалості проміжків часу у різних системах координат, які рухаються одна відносно одної..

Загалом було встановлено, що у близьких до нас галактиках згадана фаза максимуму блиску SN Ia триває два тижні. Коли ж наднова рухається від нас і її $z \approx 0,5$, тривалість максимуму блиску становить три тижні, при $z \approx 1$ – чотири тижні. Це дало змогу побудувати залежність “відносна яскравість SN Ia – її червоне зміщення” (рис. 2).

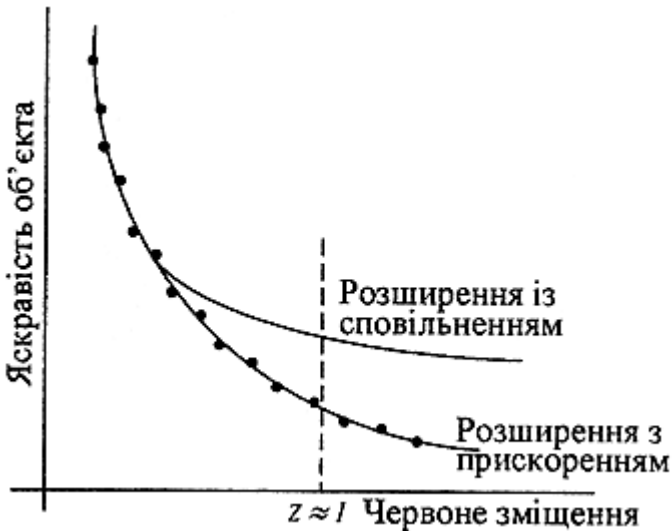


Рис. 2. Залежність яскравості об'єкта (галактики) від червоного зміщення: лінії – теорія, точки – спостереження.

У травні 1998 р. відбулася знаменна астрономічна конференція, де було розглянуто особливості розширення Всесвіту. “Більшістю голосів – 40 із 60” стверджено: почавши від червоних зміщень $z = 0,5$ це розширення є прискореним! І тим започатковано чергову революцію в космології. Йдеться про доповіді двох груп дослідників (керівник першої **С. Перлмуттер**, другої **А. Рісс** у співавторстві з **Б.Шмідтом**), перша з них опрацювала дані спостережень 35 Наднових Ia, друга 42. Незалежно було проведено співставлення отриманих видимих зоряних величин і червоних зміщень. 1 – постало питання: що є причиною цього «додаткового розтягування» простору? Про це буде мова далі: очевидно, так виявляє себе *темна енергія*. За це відкриття згадані три вчені відзначені *Нобелівською Премією з фізики 2011 р.*

Програму реєстрації спалахів SNIa реалізовано, почавши з 2002 р., на орбітальному телескопі “Габбл” камерою для дослідження далеких Наднових – Advanced Camera for Surveys. У подальшому на 2-метровому орбітальному телескопі (програма IDEM – Joint Dark Energy Mission) за допомогою ширококутних камер виявлятимуть у далеких галактиках не десятки (як дотепер), а тисячі SNIa.

Третій тест Сендиджа полягав у вимірюванні температури реліктового радіовипромінювання в різні епохи розширення Всесвіту, тобто при різних значеннях червоного зміщення z . Для стандартної моделі $T_{p\nu} \sim (1 + z)$, так що при $z = 2$ ця температура сягала 8,2 К, при $z = 3$ – 11 К. Ефект встановлюють, детально досліджуючи спектри далеких галактик і квазарів, виявляючи в них лінії поглинання, збудження яких можливе саме завдяки цьому додатковому “космічному” джерелу енергії. Конкретні позитивні результати було отримано в 2002 р. Оскільки різні z відповідають різним моментам еволюції Всесвіту, то значення $z = 2$ стосується віку 1/4 від сучасного, $z = 3$ – близько 1/8. Загалом результати, отримувані за цими трьома тестами Сендиджа, узгоджуються між собою.

Суть «безплатного ланчу» Зельдовича. В цьому афоризмі приховується глибока проблема: ледве не всі можливості у вивченні як самих «цеглинок світобудови», так і варіантів (типів) їх взаємодій – вичерпано. А нез’ясованих питань – багато, і деякі з них стосуються основ сучасної фізики.

Так, збудовано елегантну за своєю математичною досконалістю і глибинною сутністю Стандартну теорію ФЕЧ – фізики елементарних частинок, в рамках якої здійснювано важливі передбачення – аж щодо величини маси очікуваної частинки. Вершиною цих успіхів стало відкриття (2012 р.) бозона Гігса (ціна експерименту – 10 млрд. дол.).

Однак один із важливих недоліків СТ ФЕЧ – 19 числових значень її сталих доводиться привносити ззовні (як ось, швидкість світла). Тож, усвідомлюючи подальші труднощі, видатний учений ХХ ст. Яків **Зельдович** (1914 – 1987) звернув увагу на очевидне: навіщо помножувати зусилля, якщо Природа подарувала нам безплатний ланч, вона ж «уже провела Великий Експеримент», залишилось лише осмислити його результати.

Тут доречно згадати окремі досягнення ФЕЧ, без яких немислима сучасна астрономія, а особливо космологія. Це передусім знання про два типи частинок – ферміони і бозони. Перші мають спіні $s = \frac{1}{2}$, їх в одиничному об’ємі може бути не більше двох, у других спіні цілочисельний – 0, 1, може бути й $s = 2$, їхнє число в одиниці об’єму не обмежується. Далі, розглядаючи проблему *взаємодії* електричних зарядів, фізики дійшли висновку, що *вона здійснюється обміном фотонів*. Отже, є частинка – **“власник заряду”**, її спіні $\frac{1}{2}$, але є **носій взаємодії** і його спіні – парний, точніше – цілочисельний (для фотона $s = 1$). Звідси було зроблено важливий висновок: *теорії різних взаємодій можуть бути збудовані за єдиним зразком*. Пригадаємо: цих взаємодій – чотири.

Тут згадаємо, оглянувшись, головні відкриття фізики елементарних частинок. У 1932 р. **Дж.Чедвік** відкрив *нейтрон*,

зразу ж **Д.Д.Іваненко**, український фізик, “збудував” моделі ядер із протонів і нейтронів, тоді ж зформульовано ідею *сильної взаємодії*. У 1935 р. **Х.Юкава** конкретизував її: взаємодія протонів і нейтронів у ядрі обумовлена обміном допоміжними частинками (носіями взаємодії) зі спіном $s = 0$ – *мезонами* (їх – пі-мезони або ж *піони* – відкрито 1947 р.). У 1933 р. виявлено, що маса нейтрона більша, ніж протона, і, отже, може здійснюватися його розпад за схемою $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$. Цей розпад став проявом *слабкого типу взаємодії*.

Повторимо: *електромагнітна взаємодія* регулює, зокрема, взаємодію додатньо заряджених ядер і від’ємно заряджених електронів у молекулах і атомах, *слабка* – «керує» розпадом важких частинок на легші (приклад: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$), *сильна* – створює міцний зв’язок нуклонів в атомних ядрах, а *гравітаційна* керує рухом небесних тіл. У 1967 р. американські фізики **Стевен Вайнберг** і **Шелдон Глешоу**, та незалежно від них пакистанський учений **Абдус Салам** розробили єдину теорію слабких і електромагнітних взаємодій. Її головний висновок: слабкі й електромагнітні сили при енергіях порядку і вище 100 ГеВ стають нерозрізнюваними. За аналогією з електромагнітною взаємодією, де обмінна частинка – фотон, з’ясовано, що слабка взаємодія відбувається завдяки обміну квантами певного поля, названими *проміжними векторними бозонами* (їх спіні $s = 1$). Сам акт розпаду нейтрона мав би відбуватися за схемою: спочатку нейтрон перетворюється на протон з випуском W^- -бозона ($n \rightarrow p + W^-$), а потім W^- -бозон розпадається на електрон і антинейтрино ($W^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$). Ці нові частинки – W^\pm -бозони та нейтральний Z^0 -бозон, маси яких відповідно рівні 81 і 93 ГеВ, були відкриті 1983 р. у прискорювальному центрі ЦЕРН (Швейцарія).

З теорії «Всесвіту, який розширюється», випливає, що чим ближче «до початку», тим вища його температура. Цей результат одержаний астрономами. Зі свого боку, фізики,

збільшуючи енергію (тобто «температуру») частинок, які стикаються в прискорювачах, зробили висновки про зміну властивостей речовини у міру зростання енергії частинок, що її становлять. Інакше кажучи, вони крок за кроком наближаються до «Великого об'єднання» і «супероб'єднання» наявних у природі взаємодій – електромагнітної, слабкої, сильної і гравітаційної.

«Штурм» проблеми об'єднання взаємодій продовжено головним чином теоретиками. Адже «Велике об'єднання» електромагнітної, слабкої і сильної взаємодій реалізується при енергіях 10^{14} GeV (що відповідає температурі 10^{27} K), а вони в прискорювачах навряд чи будуть досягнуті. Процеси всіх чотирьох взаємодій стають нерозрізнюваними при ще більших енергіях – при 10^{19} GeV (рис. 3).

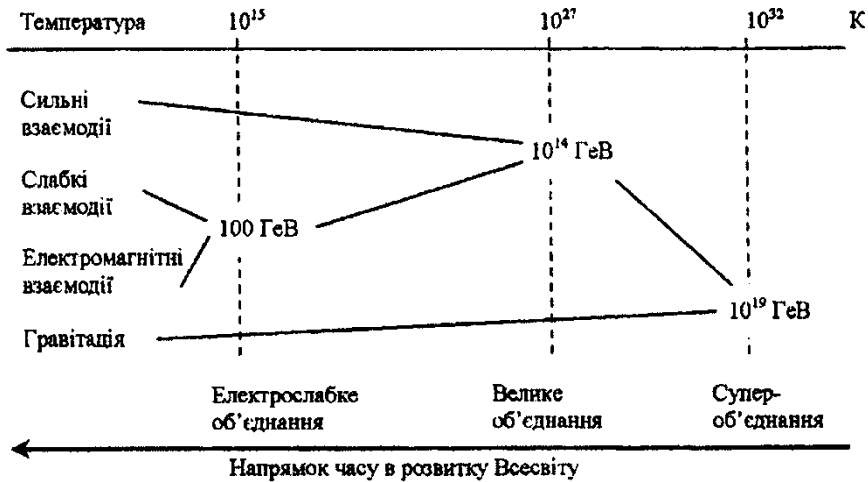


Рис. 3. Схема об'єднання-розєднання взаємодій: справа наліво – як це, можливо, «реалізувала» Природа, зліва ж направо – як її намагаються відтворити фізики

Від кварків до суперсиметрії. В реалізації Великого об'єднання, очевидно, важливу роль грають надважкі частинки:

X і Y -бозони (та античастинки \bar{X} і \bar{Y}) з масою порядку 10^{14} ГеВ і дробовим електричним зарядом ($\pm \frac{4}{3} e$, де e – заряд електрона).

Упродовж 40-х – 60-х років ХХ ст., завдяки побудовам *прискорювачів* елементарних частинок, стало очевидним, що в природі на вкрай малі частки секунди при зудареннях вже відомих, з'являються такі ж або й значно важчі частинки. Насьогодні їх загалом відомо близько 400! Виникла нагальна потреба їх систематизації, поєднання у певні групи. Так у фізику увійшли ідеї *симетрії* – від переконання, що результати експериментів не залежать від місця і часу їх проведення, оскільки закони фізики однакові у всьому Всесвіті і не змінюються з часом. Це строго, у свій час, обґрунтував француз **Жозеф Лагранж** (1736 – 1813), розглядаючи закони збереження енергії, імпульсу й моменту імпульсу. Тепер ці ідеї розглянуто під дещо іншим кутом. Як ось, таки 1932 р. **В.Гайзенберг**, тоді ще як “формальний математичний прийом”, увів поняття *ізотопічного спіна*. Це дало змогу вважати нейтрон і протон однією частинкою (із застереженням): у певному *ізотопічному* просторі проекції спіна (*ізоспіна*) на вісь z $I_z = +1$ відповідає протон, проекції ж $I_z = -1$ – нейтрон.

Згодом крім баріонного заряду B (для протона це $+1$, антипротона – 1) для відкритих нових частинок введено квантове число – *дивність* S , у 1974 р. введено *чарівність* c , 1977 р. – *привабність* b . Зрозуміло чому: бо як протон, так і нейтрон – не є насправді елементарними частинками, вони, як це довів **М.Гелл-Манн** (1964 р.) складаються з *кварків*. Їх шість: u , d , s , c , b , і t , їхні електричні заряди *дробові*, відповідно $+2/3$, $-1/3$, $-1/3$, $+2/3$, $-1/3$, $+2/3$ (протон – це комбінація uud , нейтрон – udd). Кожна з цих частинок має свою античастинку (як e^- і e^+). В усіх спіні (це важливе!) рівний $1/2$ (вони ж бо є *носіями*, “власниками” заряду).

Дещо навіть раніше Гелл-Манн (й інші) запропонував метод об'єднання відкритих в середині ХХ ст. частинок в окремі

групи, що задовільність певним *принципам симетрії*. Для системи протон-нейтрон визначальним є поворот у просторі ізоспіна на 180° , тут – на 60° . Довелося прийняти, що кожен кварк може перебувати в трьох станах. Не маючи кращих аналогій, уявляють, що кожен кварк може набувати один із трьох кольорів і має здатність їх змінювати. Це – червоний колір *R*, зелений *G* і голубий *B*. Далі приймають, що протон, нейтрон і інші частинки є стійкими, бо кварки-носії заряду обмінюються безмасовими частинками – *глюонами* (їхній спін $s = 1$). Усього це вісім глюонів, які мають ті ж кольори. Глюони (від слова “клей”) “зв’язують” кварки тим, що “викрадають” у кварка його колір і переносять його до іншого. Кажуть інакше: червоний кварк випромінює червоно-зелений глюон і перетворюється в зелений кварк і т.п. Усі ці процеси вивчає *квантова хромодинаміка (КХД)*.

Важливим було питання щодо уявлення про елементарну частинку як точковий об’єкт. Ось слова **Річарда Фейнмана** (1918 – 1988): “Виникає питання: з якою силою електрон діє сам на себе?... кількість енергії, яка оточує точковий заряд, рівна безконечності...; [а] якщо маємо справу із зарядженою сферою, то оскільки електричні сили взаємно відштовхуються, електрон має саморуйнуватися... Ми не знаємо, як побудувати самоузгоджену теорію...”. Вихід знайдено в уявленні, що насправді *електрон* (але і кожна інша елементарна частинка!) є *протяжним об’єктом типу струни*.

Водночас (і далі чи не упродовж 40 років) розпочато аналіз ідеї *суперсиметрії* (SS – «СуСи») – *уявлення, за яким частинки з дробовим і цілочисельним спінами – ферміони і бозони – “стають однією сім’єю”*. Бо ж, у Стандартній моделі ФЕЧ, ферміони є “представниками” *речовини*, “власниками” зарядів, тоді як бозони – “обслуговуючий персонал”, *носії взаємодії*. Тут – чітка асиметрія, можна б сказати драма. Адже в рамках теорій, що описують ці взаємодії, неможливо визначити

величини певних характеристик (як ось масу тої чи іншої частинки, швидкість світла тощо). Зусилля у здійсненні об'єднання двох, трьох і, нарешті, усіх чотирьох – згаданих вище – взаємодій не обіцяли дати рецепти для визначення цих параметрів.

Тож фізики майже півстоліття роблять спроби збудувати **Теорію Вищого Рівня**, в якій, як тут згадано, ферміони і бозони були б “рівноправними”. А це, річ ясна, стане можливим, **якщо кожна частинка матиме свого суперпартнера із протилежним спіном**. Так, кварки, електрон і нейтрино мали б “доповнення” – **скварки, селектрон, снейтрино** зі спінами $s = 0$. І, навпаки, фотони, глюони, W^\pm і Z^0 бозони мали б “свої” – **фотіно, глюїно, віно і зіно** зі спіном $s = \frac{1}{2}$. Усе це розігрується в 11-вимірному просторі-часі, при чому з 10 просторових вимірів сім **компактифікуються** – “згортаються”. Так, як “зникають” ширина і товщина стовпа електромережі зі збільшенням відстані до нього, залишається ж лише один вимір – висота.

II. КОСМОЛОГІЧНІ МОДЕЛІ ВСЕСВІТУ

Основоположні принципи. Будову й закономірності розвитку *Всесвіту* досліджують, аналізуючи певні математичні конструкції – **космологічні моделі**. Основні їх рівняння отримують, виходячи із ЗТВ – загальної теорії відносності за умови, що властивості Всесвіту для кожного заданого моменту часу однакові в усіх його точках і в усіх напрямках. Цей **космологічний принцип однорідності й ізотропності** Всесвіту підтверджували, як здавалося, спостереження у масштабах, більших за 300 Мпк. Можна було вважати, що, зокрема, густина в ньому є функцією лише космологічного часу: $\rho = \rho(t)$.

Побудувати ж *модель Всесвіту* – означає виявити, як змінюються з часом t його параметри: густина, температура і відстані між довільно взятими галактиками. З цією метою вводять поняття *масштабного фактора* $R(t)$. І відстань між двома вибраними галактиками (точніше їх скупченнями, однак зазвичай кажуть “між галактиками”) записують у вигляді

$$r(t) = r_0 R(t) \quad (1)$$

де r_0 – відстань між ними на момент спостереження t_0 (який співпадає з віком Всесвіту T_B). Приймають також, що $R(t_0) = 1$. Здебільшого, кажучи про модель Всесвіту, мають на увазі якраз залежність від часу t масштабного фактора $R(t)$, яким визначаються особливості розширення Всесвіту.

Одним із важливих параметрів задачі є швидкість, з якою змінюються відстані між галактиками. Диференціюючи співвідношення (1) по t , виключаючи для узагальнення відстань r_0 за допомогою цього ж співвідношення, отримуємо вираз для швидкості

$$v = \frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} r(t), \quad (2)$$

тобто *закон Хаббла*, якщо вважати, що

$$H = H(t) = \frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}, \quad (3)$$

з уточненням, що стала Хаббла є (чи може бути) функцією космологічного часу t .

У рамках класичної теорії. Обговорення типових рис космологічних моделей зазвичай ведуть, використовуючи рівняння загальної теорії відносності. Однак англійський астроном **Едвард Мілн** у 1935 р., виходячи з елементарних співвідношень ньютонівської теорії тяжіння, отримав рівняння (фактично – закон збереження енергії), з якого наглядно виявляються істотні проблеми космології.

Розглянемо велетенську однорідну хмару, що має густину ρ . На відстані R від центра хмари – на поверхні сфери радіуса R - виділимо «пробну частинку» масою m . Як довів **Ньютон**, сила притягання, що діє на цю частинку, визначається масою, яка міститься всередині сфери радіуса R :

$$M = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho.$$

Силала тяжіння діє так, ніби вся ця маса сконцентрована у центрі хмари. Притягання ж пробної частинки з боку окремих елементів зовнішнього шару взаємно зрівноважується і жодної ролі не грає.

Уявімо тепер, що частинка m рухається від хмари зі швидкістю v , причому на заданій відстані R_0 від центра сфери ця швидкість рівна v_0 . У процесі руху повна енергія частинки W , що дорівнює сумі енергії кінетичної $E_k = \frac{mv^2}{2}$ та потенціальної

$U_p = \frac{GMm}{R}$, зберігається. Позначимо далі через ε повну енергію в розрахунку на одиницю маси частинки. Тоді закон збереження її енергії набуде вигляду

$$\varepsilon = \frac{v^2}{2} - \frac{GM}{R} = \frac{v_0^2}{2} - \frac{GM}{R_0} = \text{const},$$

або

$$v^2 = \frac{2GM}{R} + 2\varepsilon = \frac{2GM}{R} + v_0^2 - \frac{2GM}{R_0}. \quad (4)$$

Оскільки $v = \frac{dR}{dt}$ і маса $M = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho$, знаходимо співвідношення:

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3} R^2 \rho + 2\varepsilon, \quad (5)$$

З цього рівняння випливають такі висновки. Якщо кінетична енергія більша від потенціальної (повна енергія $\varepsilon > 0$), то пробна частинка рухатиметься від центра до нескінченності. У протилежному випадку (при $\varepsilon < 0$) на деякій відстані

$$R_m = \frac{GM}{|\varepsilon|} \text{ швидкість частинки стає рівна нулю.}$$

Поки що тут нічого не говорилося про природу згаданої хмари. Нею може бути й частина світу галактик, доступного для спостережень. Звичайно, у Всесвіті будь-яка точка рівноправна і якогось виділеного «центра» немає. Проте всі спостереження ми провадимо із Землі, з нашої Галактики, відносно якої і визначаємо швидкості інших галактик. Тому опишемо уявно навколо нашої Галактики сферу радіусом R і розглянемо, як буде рухатися «пробна частинка» – галактика, що перебуває на відстані R від Землі. За законом Габбла, вона віддаляється від нас зі швидкістю $v = HR$. Підставляючи це значення швидкості в (5), знаходимо рівняння

$$\frac{8\pi G}{3} \left(\frac{3H^2}{8\pi G} - \rho \right) R^2 = 2\varepsilon. \quad (6)$$

Тут ρ – середня густина речовини у сфері радіуса R . Вона дорівнює масі усіх галактик, які перебувають усередині сфери, поділеної на її об'єм. Отже можна ввести деяке «критичне» значення густини:

$$\rho_{кр} = 3H^2 / 8\pi G. \quad (7)$$

Введення ж $\rho_{кр}$ дає змогу переписати співвідношення (6) у вигляді:

$$\frac{8\pi G}{3}(\rho_{кр} - \rho)R^2 = 2\varepsilon. \quad (8)$$

Типи моделей. З (8) і впливають три варіанти: $\rho > \rho_{кр}$, $\rho = \rho_{кр}$, $\rho < \rho_{кр}$, якими визначається тип моделі (рис.4):

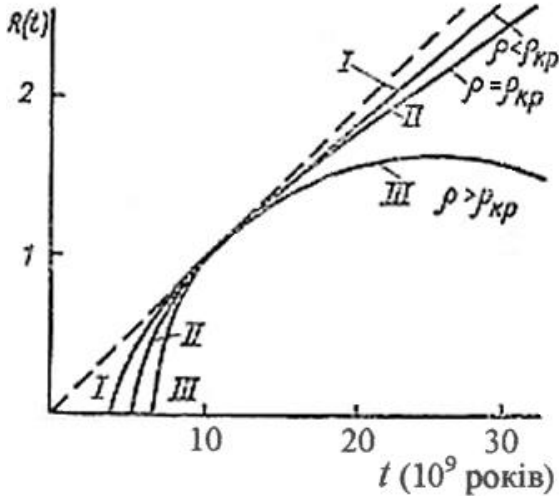


Рис. 4. Три типи космологічних моделей. Штрих описує розширення зі сталою швидкістю, точка стику усіх ліній відповідає сучасному моменту t_0 .

а) якщо $\rho > \rho_{кр}$, то розширення Всесвіту з часом змінюється стисканням. У такому Всесвіті властивості простору визначає сферична геометрія (геометрія простору з додатною кривиною). Ця модель називається **закритою** (замкнутою) **моделлю Всесвіту**, її аналогом у двовимірному світі є поверхня сфери. Тут мандрівник, обігнувши її, повернеться у вихідну точку. Водночас потрібно розрізняти **метричні** і **топологічні властивості** такого світу: довжина дуги великого кола має скінченне значення (**метрична** характеристика), але цей простір є безмежним (**топологічна** характеристика).

б) якщо $\rho = \rho_{кр}$, **геометрія Всесвіту евклідова** (кривина простору дорівнює нулю). У цьому випадку розширення

Всесвіту відбувається необмежено, з поступовим зменшенням швидкості.

Якщо $\rho < \rho_{кр}$, геометрія Всесвіту аналогічна геометрії на поверхні Лобачевського (простір від'ємної кривини), розширення не обмежене в часі.

Початкова фаза розльоту. Звернемо увагу на рівняння (4). Конкретне значення швидкості v_0 відповідає певній відстані R : $v_0 = HR_0$. Тому його можна переписати і так:

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 = \frac{8\pi}{3} \frac{GR_0^3 \rho_0}{R} - \frac{8\pi}{3} GR^2 \left(\rho - \frac{3H^2}{8\pi G}\right). \quad (9)$$

Це рівняння, залежно від величини ρ , і визначає тип "класичної" космологічної моделі. Цікаво, що певні характеристики таких моделей можна отримати, й не вдаючись до його розв'язування (яке досягається шляхом інтегрування). Оскільки спостереження вказують, що галактики рухаються «від нас», то відстані до них із часом зростають: $\frac{dR}{dt} > 0$. У минулому ж відстань до певної галактики була набагато менша. Але чим менше R , тим більшою у формулі (9) буде роль першого доданка. Тобто в минулому (при $R \approx 0$) величина $\frac{dR}{dt}$ була дуже

великою. Формально знаходимо, що в певний момент (його зручно прийняти за початок відліку часу, а отже, « t_0 секунд тому») при $t = 0$ було таке:

$$R=0, \quad \left.\frac{dR}{dt}\right|_{t=0} = +\infty!$$

Інакше кажучи, розширення почалося раптово, а «ментальні» швидкості руху в той «початковий» момент часу мали би бути нескінченно великими. А те, як змінюється відстань до тої або іншої галактики в майбутньому, визначається другим доданком правої частини рівняння (9).

Конкретно, якщо $\rho > \rho_{кр}$, то при деякому $R = R_m$ права частина рівняння стане рівна нулю, так що матимемо $\frac{dR}{dt} = 0$.

Отже, в деякий час $t = t_m$ відстань до галактики досягне найбільшого значення. Далі вирішальну роль гратиме другий доданок. А оскільки він входить у рівняння з від'ємним знаком, то буде $\frac{dR}{dt} < 0$. З подальшим зростанням часу t відстань до галактики буде зменшуватися, і врешті-решт матимемо $R = 0$! Це випадок закритого «*нульсуючого*» Всесвіту.

Якщо $\rho < \rho_{кр}$, то обидва доданки входять у праву частину рівняння (9) з додатнім знаком. При $R \rightarrow \infty$ матимемо $\frac{dR}{dt} = const$ – розширення відбуватиметься необмежено і до того ж зі сталою швидкістю.

Нарешті, можна знайти конкретну залежність масштабного фактора R від часу t на ранньому етапі розвитку, коли другим доданком рівняння (5) можна знехтувати. Інакше кажучи, розв'язати рівняння $\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 = \frac{a}{R}$, де $a = GM$. Тоді ця залежність має вигляд

$$R(t) \sim t^{2/3}. \quad (10)$$

Становлення релятивістської космології. Упродовж декількох століть після **Ньютона** астрономи мали найневиразніше уявлення про будову Всесвіту у великих масштабах. І зовсім ніхто не сумнівався, що весь навколишній Всесвіт перебуває у *статичному стані* (тобто його розміри з часом не змінюються). Але це вимагало обґрунтування, передусім – з точки зору динаміки. Адже кинутий горизонтально камінець падає, описуючи криву лінію – параболу. Тут – геометрія, але і фізика! Бо "розхил кривої" визначається

числовими значеннями його швидкості і прискорення сили тяжіння. Інший приклад. Уявімо горизонтально натягнуту гумову плівку. Легка кулька, маючи певну горизонтальну швидкість, рухатиметься на ній рівномірно і прямолінійно. Якщо ж на плівку покласти тягарець - мембрана прогнеться. І кулька відхилиться від початкового напрямку та навіть опише навколо цього тягара коло.

Тож тут доречно згадати слова Георга Рімана (1826 – 1866): «Сила – це геометрія». Але і сказане згодом французьким математиком (і фізиком) Анрі Пуанкаре (1854 – 1912): "Досвід не визначає окремо фізику і геометрію. Він підтверджує сумарно фізику і геометрію у їх взаємозв'язку. Але якщо спостереженнями вимірюють лише суму, то кожна складова має певну довільність". У полоні таких уявлень перебував і А. Айнштайн, коли, завершивши ЗТВ, узявся на її підставі намалювати загальну картину світу. Його праця «Космологічні міркування до загальної теорії відносності» (1917 р.) стала першою ластівкою в зусиллях учених створити картину світу, виходячи з нових уявлень про зв'язок речовини з геометрією.

ЗТВ є узагальненням виведеного І. Ньютоном закону всесвітнього тяжіння і включає його як граничний випадок, зокрема, коли відносні рухи двох тіл описують швидкостями, значно меншими від швидкості світла.

Основоположною ж ідеєю *загальної теорії відносності* А.Айнштейна є те, що *за умови рівності інертної і гравітаційної мас* (перша фігурує у другому законі Ньютона, друга – в законі всесвітнього тяжіння) *прояв сили тяжіння локально можна звести до розгляду прискореного руху вибраної системи координат* і навпаки. Так, для пасажера космічного корабля можна створити "комфортні земні умови", якщо надати кораблеві сталі прискорення $g = 9,8 \text{ м/с}^2$. З іншого боку, обертання планети навколо Сонця, зумовлене його притяганням, можна розглядати як її вільний рух у певним чином викривленому просторі.

Загалом – в історії фізики кожен наступний крок супроводжується новими вимогами до математичного апарату. Ось слова Галілея: *"Природа розмовляє з людиною мовою математики"* і в його часи це була мова *геометрії й алгебри*. Ньютон для цього розробив основи *диференціального й інтегрального числення*. А. Айнштейну ж, щоб пов'язати характеристики викривленого простору-часу з особливостями розподілу гравітуючої маси, довелося використати *тензорне числення*, розвинуте на основі геометричних ідей видатних німецьких математиків – К.-Ф. Гаусса (1777 – 1855) та Г.-Ф.-Б.Рімана (1826 – 1866).

Передусім Гаусс виявив, що всі кількісні геометричні властивості поверхні (двовимірного простору) приховані в елементі відстані між двома її довільними точками. Адже для кожної точки на викривленій поверхні завжди можна знайти два взаємно перпендикулярних напрями перетину так, що один із радіусів (a_1), який визначає міру викривлення, буде

найменшим, інший (a_2) – найбільшим. Величину $k = \frac{1}{a_1 a_2}$

прийнято називати *гауссовою*, або *повною кривиною*. Гаусс увів узагальнену систему координат u, v , в якій, по-перше, кут між «віссю абсцис» і «віссю ординат» не обов'язково прямий і, по-друге, координатні лінії можуть бути кривими. У такій системі координат відстань між двома нескінченно близькими точками запишеться у вигляді

$$ds^2 = Edu^2 + 2Fdudv + Gdv^2 \quad (11)$$

Відмітивши на поверхні три пари точок і визначивши відстані між ними (ds) та проєкції цих відстаней на координатні лінії, можна знайти коефіцієнти E , F і G . Ці три величини і визначають кількісну або внутрішню геометрію поверхні, зокрема, її *кривину* k . Одна із ліній, які з'єднують дві задані точки, має найменшу довжину, її названо *геодезичною*.

У свою чергу **Ріман** 1854 р. узагальнив метод Гаусса на довільне число вимірів. Він встановив, що і тут можна побудувати внутрішню геометрію n -вимірного світу, ґрунтуючись лише на елементі довжини. І тут головною характеристикою внутрішньої геометрії є гауссова кривина k . Отже, плоска геометрія Евкліда виявилась усього лише окремим випадком геометрії поверхні, коли $k = 0$; адже можливі також випадки $k > 0$ і $k < 0$.

Зазвичай для координат u і v вводять позначення x^1 і x^2 , а замість E, F і G відповідно g_{11}, g_{12}, g_{22} . Тоді отримаємо

$$ds^2 = g_{11}(dx^1)^2 + g_{12}dx^1dx^2 + g_{21}dx^2dx^1 + g_{22}(dx^2)^2. \quad (12)$$

Тут $g_{12} = g_{21}$, але такий запис дає можливість зрозуміти, як скласти вираз для величини елемента довжини за довільної кількості N вимірів. У скороченому вигляді, зокрема, при $N=4$ і координатній сітці x^1, x^2, x^3, x^4 , квадрат довжини ds – відстані між двома близькими точками (аналог теореми Піфагора про квадрат гіпотенузи) – записується у вигляді суми

$$ds^2 = \sum_{i,k=1}^4 g_{ik} dx^i dx^k. \quad (13)$$

Тут також $g_{ik} = g_{ki}$. Сукупність 16 величин, з яких незалежні лише 10, названо *фундаментальним метричним тензором* другого рангу. Його ж компоненти g_{ik} – це *метричні коефіцієнти*. Математичний апарат ЗТВ – тензори четвертого рангу. Завдяки певним *правилам згортки* їх зводять до тензорів другого рангу.

Рівняння Айнштайна. У загальній теорії відносності поєднується "математичний вимір" – відхилення геометрії від евклідовості (ліва частина рівняння) з густиною, тиском та

енергією речовини (права частина):

$$R_{ik} - \frac{1}{2} R g_{ik} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ik}, \quad (14)$$

де g_{ik} (їх для 4-вимірному простору-часу 16, бо $i, k = 4$, насправді ж 10, оскільки $g_{ik} = g_{ki}$) – згадані компоненти фундаментального метричного тензора, R_{ik} – компоненти *тензора Річчі*, що є комбінаціями g_{ik} та їх першої і другої похідних, R – *інваріант кривини* – комбінація складових обох згаданих тут тензорів (їх добутків). Повторимось: усе це – засіб визначити міру викривлення простору-часу. А ось T_{ik} – це *тензор імпульсу-енергії*, складений із компонентів *швидкостей* речовини у 4-просторі, *тиску* p і *густини енергії* $\varepsilon = \rho c^2$. В застосуванні до задач космології, зазвичай (при $p = 0$) рівняння (14) зводять до двох незалежних диференціальних рівнянь другого порядку (див. далі), що визначають зміну з часом густини ρ і масштабного фактора $R(t)$, відображаючи закони збереження маси та енергії.

Достовірність теорії. У масштабах Сонячної системи і в близьких околицях Галактики є три ефекти, які доводять правильність ідей ЗТВ. Це рух перигелію планети, відхилення променя світла гравітаційним полем зорі і зміщення в червоний бік ліній у спектрах зір.

1) Найбільшим перший ефект є в найближчого до Сонця Меркурія. Велика піввісь його орбіти $a = 57,9$ млн. км, ексцентриситет $e = 0,2066$, період обертання навколо Сонця $T \approx 88$ діб. За сто років планета здійснює навколо Сонця 415 обертів, а напрям її великої осі, відповідно до теорії Айнштейна, повертається відносно зір на кут $\varphi \approx 43'',03$ (за один оберт – на $0'',108$). За рахунок же притягання Меркурія іншими планетами вісь орбіти Меркурія повертається за сто років на $532''$, що в 12 разів перевищує релятивістський ефект. І все ж його виявлено.

2) Йдеться про вільний рух фотонів у викривленому просторі – часі. Як виявилось, світловий промінь відхиляється від прямолінійного шляху на величину, яка удвічі перевищує ту, що впливає з теорії Ньютона. Строгий розв'язок рівнянь Айнштайна отримав **Карл Шварцшільд** (1873 – 1916).

3) Третій ефект теорії Айнштайна полягає в тому, що спектральні лінії світла, випромінюваного з поверхні тіла масою M і радіусом R , зміщуються у червоний бік, це – гравітаційне червоне зміщення. Для Сонця при довжині хвилі $\lambda=4000\text{А}$ $\Delta\lambda=0,008\text{А}$. У спектрах зір білих карликів ефект істотно більший.

ЗТВ передбачає також існування гравітаційних хвиль. І тут показовими є дослідження тісних подвійних систем. Так, після 15-річних спостережень пульсара PSR 1913+16 отримано непряме підтвердження існування таких хвиль. Цей об'єкт – подвійна система, що в сузір'ї Орла. Очевидно, вона складається з двох нейтронних зір, одна з яких і є пульсаром. Як виявилось, період обертання пульсара навколо центра мас системи зменшується, а це значить, що пульсар PSR 1913+16 втрачає свою орбітальну енергію, тобто що обидві зорі поступово зближуються, рухаючись по спіралях. Інакше кажучи, пульсар проходить через периастр із випередженням (рис. 5). Теорія передбачила тут зменшення орбітального періоду на 75,8 мкс/рік, а спостереження дали значення 76,3 мкс /рік.

За відкриття і дослідження цього об'єкта **Рассел Халс** і **Джеф Тейлор** у 1993 р. отримали **Нобелівську премію** з фізики.

Аналогічно досліджують ще близько десяти таких же систем. В усіх випадках зменшення періоду практично збігається з передбаченнями ЗТВ.

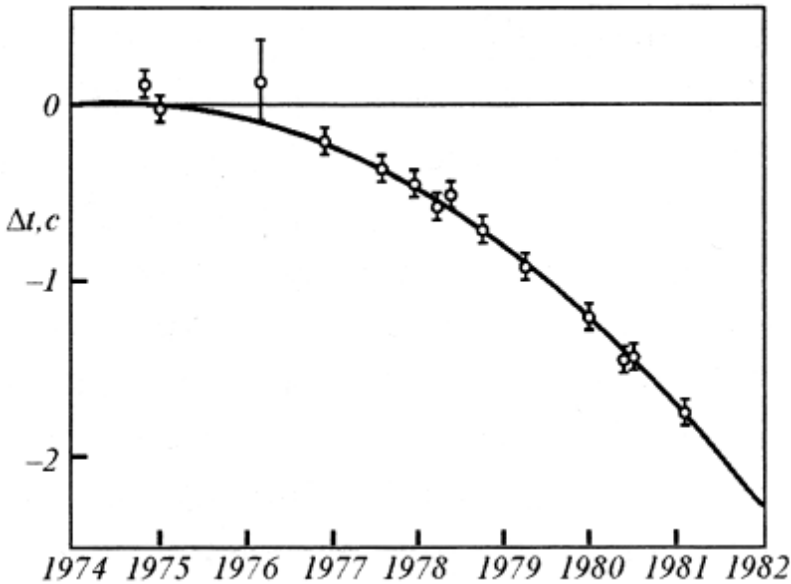


Рис. 5. Випередження в проходженні пульсара PSR 1913+16 через периастр порівняно з обчисленим, що відповідає сталому періоду обертання системи навколо центра мас (горизонтальна пряма)

Космологічна стала в ЗТВ. Узявши за основу рівняння загальної теорії відносності, Айнштайн зробив спробу збудувати модель Всесвіту в припущенні (загальному тоді переконанні!), що відстані між галактиками з часом не змінюються. Однак він зразу ж виявив, що таку *статичну* модель із наявних рівнянь отримати неможливо. Бо як і в ньютонівській теорії тяжіння, для певної рівноваги стану крім сили тяжіння потрібна ще одна – відцентрова.

Тому Айнштайн доповнив рівняння (14) *доданком* Λg_{ik} , а параметр Λ отримав назву *космологічної сталої*. Рівняння ж (14) набуло вигляду

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} (R - 2\Lambda) = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ik}. \quad (15)$$

З урахуванням тогочасних уявлень про Всесвіт і середню густину речовини в ньому **А. Айнштайн** збудував замкнуту модель Всесвіту із такими характеристиками: в такому сферичному світі налічувалося б близько 1000 млрд. галактик, а «кругосвітню мандрівку» в ньому світловий промінь здійснив би за близько 70 млрд. років. На думку Айнштайна, саме така модель мала б цілковито узгоджуватися з *принципом Маха*, за яким *інерція тіла нібито зумовлюється дією усієї речовини Всесвіту*.

Згодом, років через вісім, Айнштайн у приватній розмові з Гамовим (яка набула розголосу) сказав, що введення цього доданка – найбільша помилка його життя. Насправді ж він, не усвідомлюючи цього, врахував можливу наявність у Всесвіті *іншої, крім гравітаційної*, сили. Слід лише було в рівнянні (15) поставити його не зліва, а справа знака рівності. Це і зроблено згодом і тепер активно обговорюється. Конкретно – у випадку $\Lambda > 0$ враховується наявність певної сили *відштовхування*.

Зразу ж нідерландський астроном **Віллем де Сітгер** виявив, що рівняння (15) із Λ -членом допускає ще один розв'язок, а саме $p = 0$ і $\rho = 0$. Йдеться про порожній статичний замкнений (як і в попередньому випадку) Всесвіт. У тій моделі привернуло увагу те, *«реальна» швидкість світлового сигналу v_c залежить від відстані r фотона до початку координат, де перебуває Спостерігач*. Крім того, у цій моделі є ефект *червоного зміщення*: тут при $r \rightarrow R$ $\lambda \rightarrow \infty$. І, нарешті, коли в таку модель помістити декілька пробних матеріальних частинок, то вони будуть «розбігатися» одна від одної, причому *відстань між ними буд е зростати за експоненціальним законом*

$$r = r_0 e^{At}, \quad (16)$$

де A – стала величина. Цей розв'язок є цікавим і тепер.

Релятивістські моделі Фрідмана. Двома своїми статтями (1922 р.) **О.О. Фрідман** започаткував дослідження *нестатичних моделей* Всесвіту.

І майже зразу (у 1923 р.) Айнштайн визнав: «Я вважаю результати пана Фрідмана правильними й вичерпними. Як виявляється, рівняння поля допускають для структури простору поруч із статичними розв'язками і динамічні (тобто такі, що змінюються з часом) центрально-симетричні розв'язки». У свою чергу бельгійський астроном **Жорж Леметр** у своїй статті (1927 р.) дійшов висновку: «Бажання відшукати розв'язки, які мали б одночасно позитивні риси світів Айнштайна і де Сіттера, допровадило нас до аналізу світу Айнштайна зі змінним радіусом простору». Але якщо радіус світу зростає, то його розширення почалося з моменту, коли речовина була стиснена до величезних густин! Леметр сміливо таке припускає, надаючи станові високої концентрації речовини назву «*первісного атома*».

Питання про вихід Всесвіту із *сингулярного* стану (стану надвисоких густин речовини) далі буде обговорене окремо. А поки що зосередимо увагу на рівняннях, якими описують нестатичні космологічні моделі. Важливим моментом у релятивістській теорії нестатичного Всесвіту є запровадження так званих *супутніх координат*: просторові координати представляють у вигляді сітки, вузли якої пов'язані з частинками речовини (наприклад, із галактиками), і рухаються разом з ними. Далі, задають певну загальну форму коефіцієнтів метричного тензора, також – параметр k , яким визначають замкненість чи відкритість Всесвіту: якщо $k = 0$, то простір буде *евклідовим*, випадок $k = +1$ відповідає просторові додатньої кривини – *замкнений* Всесвіт, при $k = -1$ реалізується простір *від'ємної кривини*.

Тож на підставі заданої форми для інтервалу та обчислених компонентів тензора Річчі рівняння Айнштайна (15) зводять до системи двох диференціальних рівнянь, які пов'язують між собою швидкість і прискорення зміни масштабного фактора R залежно від інших параметрів моделі:

$$\frac{\dot{R}^2}{R^2} + \frac{2\ddot{R}}{R} + \frac{8\pi G\rho}{c^2} = -\frac{kc^2}{R^2} + \Lambda c^2, \quad (17)$$

$$\frac{\dot{R}^2}{R^2} - \frac{8\pi G\rho}{3} = -\frac{kc^2}{R^2} + \frac{1}{3}\Lambda c^2.$$

Це й є **рівняння Фрідмана**, тут – із урахуванням Λ . Як згадано вище, можна покласти, що, починаючи з певного етапу в розширенні Всесвіту, тиск $p = 0$. Тоді з системи (17) випливають такі співвідношення:

$$\rho = \frac{B}{R^3}, \quad (B=\text{const}) \quad (17a)$$

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 = \frac{8\pi}{3} \frac{GB}{R} - kc^2 + \frac{1}{3}c^2\Lambda R^2. \quad (17b)$$

Останнє рівняння й дає змогу дослідити зміну масштабного фактора з часом.

Найвідоміші нестатичні моделі. Теоретично на підставі системи рівнянь (17) можна побудувати близько двох десятків космологічних моделей. Насправді в природі «реалізувалася» лише одна – таке твердження повторювано упродовж кількох десятків років. Сьогодні можна сказати інакше: **сучасна космологія говорить про 1) інфляційну стадію розвитку Всесвіту** – і це орієнтовно **модель де Сіттера**, 2) **стадію розширення**, опис якої, очевидно, можна апроксимувати **моделлю Айнштайна–де Сіттера** і 3) **стадію прискореного розширення**, тут, можливо, застосовна “верхня вітка” **моделі Леметра**. Цим виявляє себе складність процесів, що відбуваються у Всесвіті.

Ось декілька найтипівіших моделей, які «будують» інтегруванням системи рівнянь (17), зазвичай нехтуючи тиском. При цьому формально задають певне значення густини речовини у Всесвіті ρ на теперішній момент часу t_0 , як також певне значення Λ . Параметр k визначають зі співвідношення між заданим значенням ρ і теоретично обрхованим $\rho_{кр}$.

Майже у всіх моделях, які тут розглядаємо, йшлося про розширення Всесвіту з деякого надщільного стану, коли радіус кривини (відстані між фіксованими матеріальними точками) формально дорівнював нулю. Цей стан приймають за початок відліку часу ($t = 0$ при $R = 0$). Час, що проминув від моменту, коли $t = 0$, прийнято називати «**віком**» *моделі*.

Хоча нестатичні моделі названо загалом *моделями Фрідмана*, кожна з них має ще й свою конкретнішу назву (рис. 6).

1. Пульсуюча модель. «Реалізується» вона, коли середня густина речовини у Всесвіті ρ більша від критичної $\rho_{кр}$. У такій моделі масштабний фактор R (радіус кривини) зростає від нуля, досягає максимального значення і знову зменшується до нуля. Тут крива $R(t)$ є циклоїдою.

2. Модель Леметра. Особливістю її є те, що масштабний фактор $R(t)$ зростає від нуля нескінченно, але протягом деякого часу Δt_0 його значення змінюється неістотно: Всесвіт тоді наче «застигає». Тут вік від початку розширення до наших днів мав би сягати 70 млрд. років. Мовою класичної теорії поведінку масштабного фактора можна пояснити так: на декілька десятків мільярдів років сили притягання у Всесвіті зрівноважуються силами відштовхування. Ця модель була особливо приваблива тоді, коли здавалося, що «вік Всесвіту» $t_0 \sim 2$ млрд. років (за старим значенням сталої Габбла) суперечить віку Сонячної системи...

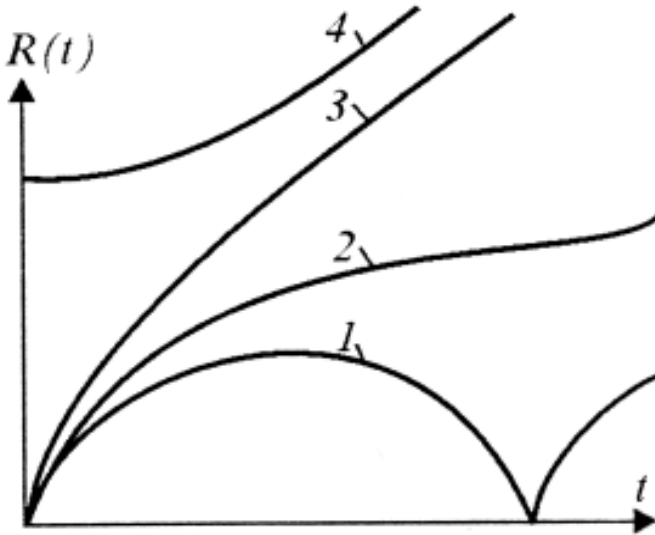


Рис. 6. Найтипівіші космологічні моделі: 1) пульсуюча модель, 2) модель Леметра, 3) модель Айнштайна–де Сіттера, 4) модель Еддінгтона-Леметра.

3. Модель Айнштайна–де Сіттера. Таку назву має модель, для якої $\rho = \rho_{кр}$ ($k=0$) і $\Lambda = 0$. У цьому випадку існує точний розв’язок рівняння (17б):

$$R(t) = \sqrt[3]{6\pi G\rho(t_0)}t^{2/3}. \quad (18)$$

Тут також густина зменшується з часом за законом

$$\rho = \frac{1}{6\pi Gt^2} = \frac{8 \cdot 10^5}{t^2} \text{ г/см}^3. \quad (19)$$

Нагадаємо: в **моделі де Сіттера** масштабний фактор зростає експоненціально відповідно співвідношенню (17).

Потреба фази роздування. Теорія розширеного Всесвіту зіткнулася із рядом проблем, які вдалося усунути за допомогою

моделі роздувного (інфляційного) Всесвіту. Ось найважливіші з них.

1. **Проблема ентропії**: чому у Всесвіті число фотонів реліктового радіовипромінювання в одиниці об'єму N_γ приблизно в 10^9 разів перевищує концентрацію важких частинок N_B ? Також – чому ядра атомів мають додатний електричний заряд, тоді як електрони від'ємний?

2. **Проблема горизонту** (або кривини): чому Всесвіт у великих масштабах однорідний та ізотропний, так що інтенсивність реліктового радіовипромінювання практично не залежить від напрямку?

3. **Проблема евклідовості геометрії** (плоского простору Всесвіту): чому густина матерії у Всесвіті дуже близька до її «критичного» значення ($\rho = \rho_{кр}$, $\Omega = \rho / \rho_{кр} = 1$), а геометричні властивості простору такі близькі до властивостей плоского евклідового простору.

4. **Проблема однорідності і первинних флуктуацій** (утворення галактик): чому в дуже великих масштабах Всесвіт однорідний, а в менших спостерігаються порожнечі (войди)? І як у Всесвіті виникають неоднорідності, з яких надалі утворюються галактики?

5. І, нарешті (або – передусім), – найбільшою проблемою теорії розширеного Всесвіту, було **питання про сингулярність**: чи справді Всесвіт народився у стані з нескінченною густиною?

Першим про вакуумоподібний стан речовини в 1965 р. повів мову **Ераст Глінер**, прийнявши, що спочатку у Всесвіті був вакуум, описуваний космологічною сталою. З нього породжувалася речовина, яка розширювалася під дією антигравітації. З початку 80-х років, після праць **Алана Гута** і **Андрея Лінде**, захоплення ідеєю інфляції набуло масового характеру, уже запропоновано безліч різних космологічних сценаріїв. Водночас пригадаємо і те, що сьогодні най-

інтригуючим є сутність вакууму. Тож – кілька слів передусім про нього.

Проблема вакууму і “реалізації його можливостей” у породженні різних типів елементарних частинок вимагає окремого обговорення. Тут важливим мірилом є *планківські одиниці довжини l_{pl} , часу t_{pl} , маси m_{pl} і густини ρ_{pl}* , отримані комбінацією трьох фундаментальних фізичних сталих – швидкості світла c , гравітації G і сталої Планка $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж·с ($\hbar = h/2\pi$):

$$l_g = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^3}} \approx 1,6 \cdot 10^{-33} \text{ см}, \quad t_g = \frac{l_g}{c} = \sqrt{\frac{G\hbar}{c^5}} \approx 5,3 \cdot 10^{-44} \text{ с}, \quad (20)$$

$$m_g = \sqrt{\frac{c\hbar}{G}} \approx 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ г}, \quad \rho_g \approx \frac{m_g}{l_g^3} = \frac{c^5}{G^2\hbar} \approx 5 \cdot 10^{93} \text{ г/см}^3,$$

Первісною “коміркою“, яка, за сучасними уявленнями, роздуваючись, стає Всесвітом, є об’єм усього лише l_{pl}^3 . Загалом сценарій тут такий:

1. Частинки матерії на початку не мають мас.

2. У вакуумі стану, тобто в «резервуарі» віртуальних частинок і полів, прихована потенціальна енергія, густина якої пов’язана з густиною вакууму ρ_v співвідношенням $\varepsilon_v = c^2 \cdot \rho_v$ причому в деяких варіантах теорії приймалося $\rho_v = 10^{74}$ г/см³, в інших $\rho_v = \rho_{pl} = 10^{94}$ г/см³, так що густина енергії цього псевдовакууму відповідно рівна 10^{88} Дж/см³ або 10^{108} Дж/см³.

3. Завдяки роздуванню Всесвіту температура стрімко зменшується, тоді як густина вакууму до певного часу залишається незмінною.

Повторимось, за визначенням, **вакуум** – найфундаментальніший із відомих тип фізичної реальності. Він є основою і передумовою існування безлічі фізичних явищ. Потенційно (віртуально) вакуум містить усілякі частинки і стани, які можуть

з нього породитися за відповідних умов, але водночас актуально в ньому нічого немає. Відомо, проте, як можна "вивудити" пару "частинка-античастинка" з вакуумної безодні: для цього потрібно "мати" силове поле, завдяки енергії якого згадана пара одержує свої реальні маси.

Будь-яке інфляційне розширення починається з планківських розмірів і часів, від яких сучасні закони фізики починають адекватно описувати процеси, що відбуваються в цей момент. Єдина причина прискореного розширення – від'ємний тиск, який можна описати скалярним полем. Так усуваються труднощі «класичних» моделей:

1. Проблема ентропії і зарядової асиметрії. При енергіях порядку 10^{15} ГеВ ефективно народжуються надважкі X -бозони і відповідно в такій же кількості античастинки \bar{X} . Кожна з них може – двома різними каналами і (що дуже важливе) з *децю неоднаковою імовірністю* – розпадатися на кварки й антикварки. Наприклад, X -бозон, який має електричний заряд $+4/3$, розпадається на два u -кварки ($X \rightarrow q_u + q_u$) або ж на антикварк \bar{d} із зарядом $+1/3$ і антилептон (позитрон e^+) з електричним зарядом $+1$ ($X \rightarrow q_d + e^+$). Після розпаду X - і \bar{X} -бозонів утворюється певний надлишок кварків над антикварками; після їх об'єднання в протони й антипротони з'являється невеликий надлишок частинок над античастинками, а після їх анігіляції – «залишок», що й спостерігається сьогодні, як «звична» речовина. При цьому, унаслідок процесів анігіляції утворюється, як показали розрахунки, також надлишок числа фотонів по відношенню до числа баріонів. Існування двох каналів (схем) розпаду X -бозона на кварки або антикварк-антилептон фактично означає, що баріонний заряд не зберігається. Звідси випливає висновок: у природі повинні відбуватися процеси розпаду протонів. Період піврозпаду протона оцінений в 10^{32} років.

2. Проблема горизонту вирішується так. Точки, з яких ми сьогодні приймаємо сигнали (звідки до нас приходить реліктове радіовипромінювання), «до роздування» перебували дуже близько одна до одної, усередині загального горизонту видимості для того моменту. Між ними, звичайно, відбувався обмін сигналами (квантами енергії) і відповідно відбулося вирівнювання температури. Пізніше, внаслідок роздування ці точки розійшлися на відстані, істотно більші від відстані до горизонту. Тож ми приймаємо сигнали усього лише з невеликої частини тієї області, де відбулося вирівнювання температури.

3. Проблема плоского простору також легко з'ясовується і навіть допускає пояснення за допомогою елементарного прикладу. Якщо в початковий момент t_{Pl} кривина двовимірного простору – поверхні кулі (її відхилення від площини) була дуже великою, то після роздування (а йдеться про фантастичне збільшення масштабів) геометрія його поверхні стає практично евклідовою.

Обговорення загальної картини розширення Всесвіту в ХХ ст. розпочинали з деякого мінімального часу $t_{min} \approx 10^{-6}$ с, дотримуючись погляду, що за допомогою наявної фізичної теорії неможливо описати явища, які відбувалися при $t < t_{min}$. Всю подальшу історію розвитку Всесвіту, залежно від процесів, які відігравали головну роль, прийнято поділяти на чотири стадії: адронну еру, лептонну еру, еру фотонної плазми та післярекомбінаційну еру.

Загалом розвиток Всесвіту наближено можна описати комбінацією трьох моделей – де Сіттера, Айнштайна-де Сіттера та Еддінгтона.

III. ТЕМИ КОСМОЛОГІЇ ПОЧАТКУ ХХІ СТ.

Флуктуації РРВ. Крім згаданої вище великомасштабної флуктуації інтенсивності РРВ, що є відображенням руху Сонця (півсфери неба в бік спостерігача, іншої – від нього), все ж очікувано менш масштабні.

Для їх виявлення здійснено запуски декількох космічних апаратів – у СРСР (1984 р.) «Релікт», у США (відповідно в 1989 і 2001 р.) COBE (COsmic Background Explorer), і WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe). Використано також стратосферні апарати BOOMERANG, MAXIMA, ACBAR і наземний СБІ. У цілому дослідження були успішними. Їх було уточнено й доповнено (2010–2012 рр.) результатами «Планка» (рис. 7). Про це свідчить і Нобелівська премія 2006 р., присуджена американським вченим **Джону Мазеру** і **Джорджу Смуту** – керівникам однотисячного колективу учених, інженерів і техніків проекту COBE: "За роботу, що допомагає просунути у вивченні процесу виникнення Всесвіту і розумінню походження галактик і зір".

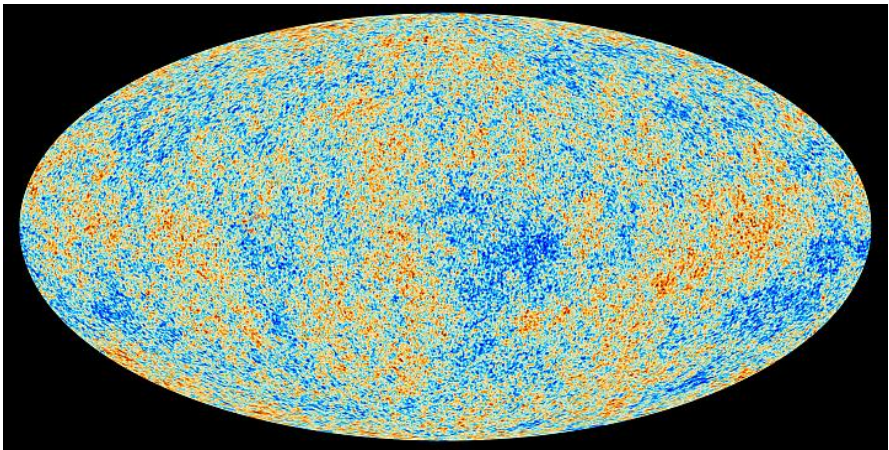


Рис. 7. Кутовий розподіл інтенсивності реліктового випромінювання за даними експерименту Planck (флуктуації $\delta T \approx 0,0002 \text{ K}$)

За даними згаданих спостережень WMAP здійснено побудову **кореляційної функції** – залежності усереднених квадратів різниць інтенсивностей РВ $(I_2 - I_1)^2$ або ж, що те саме, температур $(T_2 - T_1)^2$ як функції кутової відстані θ між довільно взятими точками “1” і “2” небесної сфери. **Акустичні піки** зайняли на рис. 8 місце, близьке до передбаченого А.Д. Сахаровим (1921 – 1989) ще 1967 р. (тому і є поняття **сахаровських коливань**). Прийнято підкреслювати: з часу появи цього графіка космологія стала прецизійною наукою.

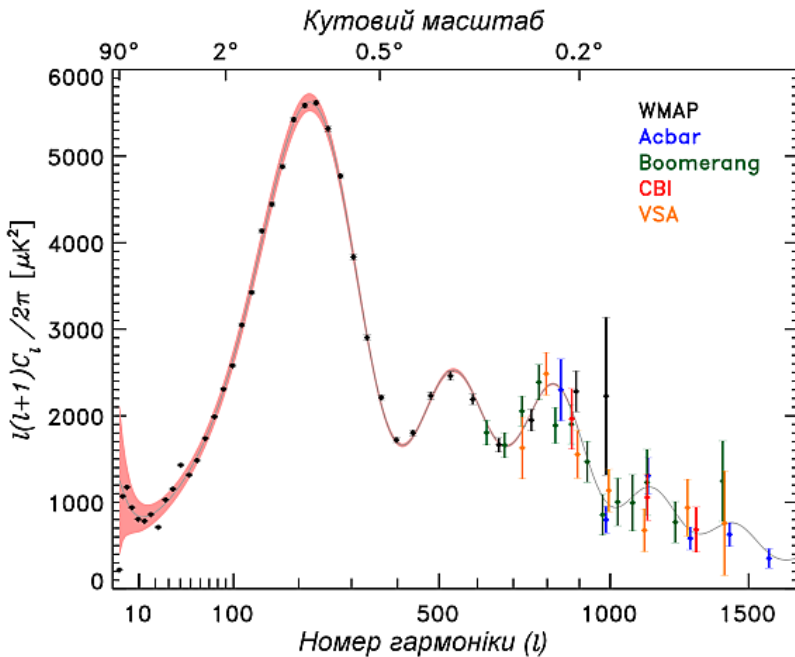


Рис. 8. Спектр флуктуацій реліктового випромінювання за даними експериментів: космічного WMAP, наземних CBI та VSA та балонних ACBAR і BOOMERANG. По горизонталі – номер кутової гармоніки (мультиполя) та відповідний їй кутовий масштаб (зверху), по вертикалі – нормований спектр потужності флуктуацій (тобто відображення флуктуацій температури).

Приглянемося до рис. 8 уважніше. Верхня горизонтальна шкала вказує на кутові відстані між точками неба, на яких виявляють себе відхилення «від середнього» інтенсивності (температури) РРВ. Перший максимум, головний, – при кутовій відстані близько 1° , другий – $0,33^\circ$, третій – $0,2^\circ$. З огляду, зокрема, на багатющу інформацію, яку отримано, незважаючи на математичну складність проблеми, сформульовано відому тезу: Рис 7. віддзеркалює процеси, які відбуваються «на сфері останнього розсіювання – ОР» при переході від гарячого стану, який «зовні» сфери, до звичного для нас «холодного». Уявляємо: зі зростанням відстані «в той бік» ми могли б «заглибитися» у все більш ранні стадії розвитку Всесвіту.

Відстань же «від нас» до сфери ОР описуємо величиною червоного зміщення z (яке тим більше, чим далі у просторі перебуває об'єкт, що світиться). У шарі ж сфери ОР відбуваються процеси рекомбінацій, тут кванти світла вже «відриваються» від речовини і можуть вільно пронизувати «все, що всередині «нашої» сфери останнього розсіювання. Оскільки ж вона стрімко продовжує розширюватися, то «бувші жорсткі» кванти згодом і стають «РРВ» – реліктовим радіовипромінюванням. Ці кванти залишають сферу ОР в момент часу t_1 і досягають Спостерігача (нас) в момент t_0 .

Зі співвідношення для зміни z часом температури в інфляційній моделі типове для перебігу процесів рекомбінацій її значення ($T \sim 3000\text{K}$) досягається при $t_1 \sim 10^{13}\text{с}$, коли $z \sim 1000$. Протяжність -пов'язаних зон тут сягала значення $D \sim ct_1$. Вік же Всесвіту «для нас», беручи до уваги режим його розширення, $t_0 \sim 3 \cdot 10^{17}\text{с}$, а $z = 0$. Тож відстань d_m до сфери останнього розсіювання – горизонта частинок – в космологічній моделі зі степеневим законом зростання масштабного фактора оцінюють величиною $d_m \sim ct_0$. Звідси отримуємо, що очікуваний максимум флуктуацій (перший із сахаровських піків) має бути на такому кутовому масштабі, під яким спостерігається згадана вище зона на момент рекомбінацій: $\Theta \approx (1 + z_1)ct_1/ct_0$, що при наведених вище

величинах дає положення максимуму флуктуації РРВ при масштабі бл. 1° . Це якраз і відображене на рис. 8.

Важливий тут аспект проблеми ілюструють таким порівнянням. Звучання певного музичного інструмента відрізняється від іншого тембром, тобто «якістю, забарвленням» – сукупністю *обертонів*, що супроводять основний тон найменшої частоти (і якщо частоти обертонів кратні частоті основного тону, їх звать *гармоніками*). Отже, обговорювану вище *сферу останнього розсіювання* можна розглядати як своєрідний *сферичний барабан* – 2-вимірну поверхню. Тепер – про математичний апарат аналізу цих коливних рухів. Коливання струни описують за допомогою *тригонометричних функцій*, круглої мембрани – *бесселевих функцій*. Коливання ж «на сфері» відображають *сферичними функціями*. В кожному випадку йдеться про спільний внесок тонів та обертонів у величину відхилення струни (і ін.) від положення рівноваги. Для опису ж коливань, які здійснює сфера, – 2-вимірних, *сферичних гармонік* Y_{lm} – використовують числа l і m , причому для кожного l ціле число m приймає значення від $-l$ до 0 і далі до $+l$.

Величину l прийнято *іменувати кутовим моментом*, що співвідносний із флуктуаціями кутового масштабу π/l . Вводиться поняття *мультиплета* – комбінації усіх «тонів», що мають однакове l . Для кожного з них можна обчислити відповідну амплітуду C_{lm} , що можливе якраз за допомогою сферичних гармонік. Оскільки ж Всесвіт ізотропний, то фактично залежності згаданої амплітуди від m немає. Тому загалом йдеться про сферичну функцію порядку n як суму $(2n + 1)$ «однорідних поліномів ступеня n » – *поліномів Лежандра*. Врешті-решт і отримують для середньоквадратичної флуктуації температури $\langle(\Delta T)^2\rangle$ співвідношення

$$\langle(\Delta T)^2\rangle \approx T^2 \int \frac{l(l+1)}{2\pi} C_l d \ln l. \quad (21)$$

Підінтегральна величина якраз і визначає потужність, що припадає на одиничний логарифмічний інтервал l , інакше –

сукупний внесок кутових моментів. Його і відкладено на вертикальній шкалі рис. 8. Саму ж величину C_l іменують *спектром потужності* флуктуацій температури рРВ.

Винятково важливим і математично вкрай нелегким є питання про взаємозв'язок реєстрованих флуктуацій з параметрами певної космологічної моделі. Адже щоб знайти величину C_l при $l = 200$, доводиться розглядати сукупність 400 рівнянь... Річ ясна, реалізуються певні спрощення – аналітичні наближення, але і розробляються відповідні програми обчислень на потужних ЕОМ.

Аналіз рис. 8 передбачає урахування таких параметрів космологічної моделі: густини баріонної речовини ρ_b , густини темної матерії ρ_{tm} , переобчисленої в масу темної енергії – ρ_{te} , сталої Габбла H , параметра k , що визначає кривину простору, загалом – 11 параметрів моделі. Розв'язки згаданих рівнянь отримують «перебиранням» величин кожного зі згаданих параметрів. Зміна одного чи двох із них веде до зсуву вправо-вліво положення сахаровських піків рис. 22.8, до «придушення» чи ввищення того або іншого.

За даними Космічного телескопа «Планк», найбільш адекватною, що узгоджується з результатами спостережень, виявляється така добірка параметрів «нашого Всесвіту»: звичної для нас баріонної речовини – 4,9 % (з цього щоправда лише 0,5% «світної»), темної матерії (невідомої все ще природи) – 26,8 %, «темної енергії» – 68,3 %, стала Габбла $H = 68 \pm 9$ км/с/Мпк, «вік Всесвіту» – 13,8 млрд. років, реалізовується модель евклідового простору ($\kappa = 1$).

Суть космомікрофізики. *Космомікрофізика* – порівняно нова галузь науки, завданням якої є встановлення взаємозв'язку між мега- і мікросвітом. Тобто – йдеться про всебічне поєднання (навіть злиття) ідей, законів і взаємозалежностей, встановлених при вивченні світу елементарних частинок, із сучасними

уявленнями про Всесвіт з усіма спостережуваними даними, що вже є в розпорядженні астрономів.

“Космомікрофізика, що виникла на основі ідей великого синтезу фундаментальних сил природи, за необхідністю поєднує у своїх побудовах аналіз із синтезом... (Вона) – закономірний результат внутрішнього розвитку і фізики елементарних частинок, і космології. Поява цієї науки зумовлена злиттям двох тенденцій – розвитку теорії елементарних частинок, нетривіальні прояви якої розкриваються лише в процесах при надвисоких енергіях, і виникненні уявлень про нові, форми матерії, що є необхідні для самоузгодженого опису сукупності спостережуваних явищ у Всесвіті.” (М.Ю. Хлопов, 2003 р.).

Розмаїття матеріальних структур у нашому Всесвіті зформувалося і підтримується завдяки вже обговореним вище **чотирьом типам взаємодій** між його окремими “частинками”. Першою була усвідомлена *гравітаційна* взаємодія, тобто взаємне притягання, завдяки якому “маємо” планети й зорі. “Носієм” взаємодії тут є (поки що гіпотетичний) *гравітон*.

Значною мірою теоретичні *передбачення* стали можливими завдяки двом концепціям: 1) *фізичного поля* і 2) *симетрії* з її вершиною – *суперсиметрією*.

Прийmemo ось це визначення, дане **Л.Б.Окунем** (2005): *фізичне поле* – система із безконечним числом ступенів свободи, що змінюється в просторі і часі. Будь-які силові впливи частинок одна на одну при зміні їхнього положення можуть передаватися лише у формі збурень поля, які поширюються зі скінченною швидкістю від одної точки до іншої. Поле є носієм енергії й імпульсу. Завдяки взаємодії двох полів елементарні частинки “набувають” масу – кожна у свій час, на певному етапі зміни параметрів системи.

За особливостями своїх проявів поле може бути скалярним, векторним або ж тензорним. Як ось, у кімнаті, при закритих вікнах і дверях, температура однакова в усіх точках і не

залежить від напрямку, і цей стан якраз описують скалярною функцією. У космології “особливо популярним” є скалярне поле, ним, зокрема, описують “стан системи” – *вакуум*.

Прикладом дієвості фізичного вакууму є *лембівське зміщення лінії в спектрі атома водню*. Як виявили у 1947 р. **Уїльям Лемб і Роберт Різерфорд** (США) стан $2S_{1/2}$ знаходиться вище, ніж $2P_{1/2}$, на величину $\Delta E = 1057,77$ МГц (теоретичне – 1057,19 МГц). Це стало блискучим підтвердженням теорії Дірака про “реальність фону заповнених станів із $E < 0$ ” і, отже, впливу флуктуацій цього нульового поля вакууму на електрон в атомі водню (**Нобелівська** премія 1955 р.).

Із розгляду всіх складових тензора імпульсу-енергії в рамках загальної теорії відносності випливає, що тиск p_ϵ у вакуумному середовищі від’ємний. І пов’язаний він із густиною енергії ϵ_ϵ так: $p_\epsilon = -\epsilon_\epsilon = -c^2\rho_\epsilon$.

Із цього незвичайного зв’язку між тиском і густиною вакууму випливає, що незважаючи на роздування (!), густина енергії вакууму залишається незмінною: $\epsilon_\epsilon = const$. Справді, відповідно до першого закону термодинаміки (закону збереження енергії) кількість переданої системі теплоти dQ витрачається на збільшення її внутрішньої енергії dE і роботу pdV , виконану при зміні об’єму системи V . Ці величини пов’язані співвідношенням $dQ = dE + pdV$. В даному випадку $dQ = 0$.

А оскільки $E = \epsilon V$, то $dE = -pdV$. Тому при $P = -\epsilon$ маємо $d(\epsilon V) = \epsilon(dV) = 0$ і $d\epsilon = 0$, тобто $\epsilon = const$.

Еволюція Всесвіту “автоматично” передбачає і розвиток речовини в ньому. Приймають, що потенціальна енергія взаємодії частинок E_{II} «регулюється» особливим *скалярним полем Гігса* (а точніше, полями Гігса. Взаємодіючи з елементарними частинками, поля Гігса і породжують їхню масу, яка тим більша, чим сильніша взаємодія поля з частинкою. Кажуть, що частинки одержують масу, «проковтуючи» *бозони*

Giggса – «згустки» полів Гіггса. Цей механізм порівнюють із поглинанням чорнила промокаткою, де шматочки паперу – це окремі частинки, а чорнило – енергія поля Гіггса. Залежність же потенціальної енергії взаємодії частинок від величини поля φ від потенціалу φ) зі зменшенням температури змінюється складним чином. Праця **Пітера Гіггса** й **Франсуа Енглєрта** відзначена **Нобелівською премією 2013 р.**

Проблема темних маси та енергії. Сценарій становлення нашого Всесвіту, очевидно, буде відображений за допомогою нових математичних ідей і прийомів. Математика тут вкрай складна, тож доводиться ухилятися від її обговорення, обмежуючись лише якісною характеристикою цих ідей (детальне обговорення проблеми є в кн. **М. Гріна, Дж. Шварца та Е. Вітєна** "Теорія суперструн" у 2-х томах, М., 1990).

Передусім теорія ФЕЧ нездатна "включити в себе" гравітацію. Вона не пояснює, чому є три покоління (родини) кварків і лептонів. А ще – вона потребує "введення вручну, ззовні" 19 констант для опису мас окремих елементарних частинок та інтенсивностей їх взаємодій (а це – швидкість світла, стала Планка, гравітаційна стала та ін.).

Темна ж енергія в космології – гіпотетична форма енергії, що має від'ємний тиск і рівномірно заповнює весь простір Всесвіту. Згідно з положеннями загальної теорії відносності, гравітація залежить не лише від маси, але і від тиску, до того ж від'ємний тиск має породжувати відштовхування, антигравітацію.

Існує декілька варіантів пояснення сутності темної енергії, зокрема:

темна енергія – це *космологічна стала*, незмінна енергетична густина, що рівномірно заповнює простір, або ж

це *квінтесенція* – динамічне поле, енергетична густина якого може змінюватися в просторі-часі.

Остаточний вибір між цими варіантами вимагає високоточних вимірів швидкості розширення Всесвіту, щоб зрозуміти, як ця швидкість змінюється з часом.

Заслуговує особливої уваги «Експеримент ВІСЕР2, який підтверджує найважливіше передбачення теорії космічної інфляції». Використовуючи спеціалізований 26-см телескоп, який (при температурному режимі приймача 0,27К) працює на Південному полюсі вимірюють поляризацію реліктового радіовипромінювання. Уже зроблено висновок, що «на ранній стадії розвитку Всесвіту в ньому гуляли сильні гравітаційні хвилі, які можуть виникнути лише на стадії інфляції».

Перспективи теорії струн. Наприкінці ХХ ст. фізика, скажемо точніше – *космомікрофізика*, вийшла на якісно вищий рівень опису властивостей матерії – рівень *суперструн*. Найдоцільніше тут, мабуть, навести слова з Передмови редакторів перекладу “Теорії суперструн” – **І. Ареф’євої** та **І. Воловича**: “Теорія суперструн – це сучасний варіант єдиної теорії фундаментальних взаємодій, іноді її навіть звать теорією всього суцього... Струна – це крива у просторі, тому *теорія струн – це теорія кривих, тобто протяжних об’єктів*... Зі зміною часу струна замітає певну поверхню, *дія* для струни вводиться дуже природно – *це якраз площа заметеної поверхні*. Взаємодія струн також вводиться дуже природним геометричним чином – вона пов’язана з процесами розриву і злипання струн... В теорії суперструн здійснився синтез різноманітних ідей і методів теоретичної і математичної фізики.

Теорія струн заторкує найглибші питання світобудови і є найбільше розробленою сучасною спробою відповіді на питання про природу фундаментальних взаємодій. Однак, незважаючи на великий інтерес до теорії і пречудові досягнення, слід сказати, що основні проблеми тут залишаються відкритими. З фізичної точки зору головна проблема – відсутність експериментальних передбачень...»

Повторюючись, скажемо: з 1968 р. фізики здійснюють спробу розглядати елементарну частинку як об'єкт протяжністю l_{pl} . Тобто – у фізику введено новий (і несподіваний!) принцип: на найменшому, мікроскопічному рівні все складається з вібруючих волокон. І – вже немає мови про різні частинки, а йдеться про різні ноти, які звучать на фундаментальній струні. А різні моди коливань породжують різні маси і константи взаємодії. Чим більша амплітуда і менша довжина хвилі, тим більша енергія, а нею і визначається маса елементарної частинки.

Математичне узгодження рівнянь теорії струн досягають, якщо колювання струни відбувається в 11-вимірному просторі-часі: тут 10 просторових, з них сім компактифікуються – згортаються в кільця розміром l_{pl} . Щоправда, є теорії, в яких деякі з цих додаткових вимірів можуть простягатися на нескінченність. Ми їх, однак, не сприймаємо, бо "приковані до своєї 3-вимірної гіперповерхні". Теорія ж суперструн є частиною грандіозного синтезу, що має назву *М-теорії* (від слова "мембрана").

Слово **С. Вайнбергу** (2004 р.): "Це буде єдина фундаментальна теорія. Але поки що ніхто не знає, як записати рівняння цієї теорії. А головне – невідомо, які фізичні принципи керують такою фундаментальною теорією". Тим часом, скажімо, в основі загальної теорії відносності лежить принцип еквівалентності тяжіння й інерції!

Не виключене, що теорію струн не будуть формулювати "в рамках простору-часу". Так. **С. Вайнберг** говорить про необхідність змін наших уявлень про матерію, простір і час. Аналогічно висловився й **Е. Віттен**: "Поняття "час-простір" приречене, від нього, очевидно, доведеться відмовитися".

Песимістичні висновки, однак, зробив відомий американсько-канадський фізик **Лі Смолін** у кн. «Неприємності з фізикою: зліт теорії струн. Занепад науки і що з цього випливає»

(2006 р). Ось його головні зауваження: 1) за 20 років, по при всі зусилля, теорія не зробила нових передбачень, які можна б перевірити, 2) число струнних теорій, які явно не суперечать спостереженням, сягає 10^{500} , критеріїв вибору практично нема, немає нашого розуміння більшості з цих теорій, 3) теорія струн базується на декількох ключових припущеннях, для яких є основи, але немає доказів. Загалом – «не знаємо, які фундаментальні принципи лежать в основі теорії, не знаємо, якою мовою це буде описане».

Смолін наводить слова однодумців, як ось **Герарда т' Хоофта**: «Теорія струн – це хіба передчуття...», Нобеліанта **Девіда Гросса**: «Ми не знаємо, про що говоримо...». І – резюмує: очевидно, альтернатив теорії струн нема, але як ми це можемо сказати, якщо точно не відомо, що вона собою являє?. Принаймні можемо сказати: ця теорія постулює, що насправді наш світ фундаментально відрізняється від світу, який ми знаємо. І якщо її ідеї правильні, то вимірів у нього більше трьох, а тому значно більше сил та частинок. Цей світ набагато більш безкрайній, ніж думали, і ми бачимо значно менше, ніж наші пращури бачили з печери.

Доводиться пригадувати сказане ще 2000 років тому римським філософом **Сенекою**: природа не показує одразу всі грані свого єства, більшість істин, на певний час ще прихованих, вона залишає для майбутніх поколінь допитливих...

Література

Архангельская И.В., Розенталь И.Л., Чернин А.Д. Космология и физический вакуум. – М.: УРСС, 2006. – 216 с.

Бисноватый-Коган Г.С. Релятивистская астрофизика и физическая космология. – М.: Красандр, 2011. – 376 с.

Грин Брайан. Элегантная Вселенная. Суперструны, скрытые размерности и поиски. – М.: УРСС, 2005. – 288 с.

Долгов А.Д., Зельдович Я.Б., Сажин М.В., Космология ранней Вселенной. – М.: Изд. МГУ, 1988. – 199 с.

Грин М., Шварц Дж., Виттен Э. Теория суперструн. – М.: Мир, 1990. – Т.1. – 518 с.

Вайнберг С. Первые три минуты. – М.: Энергоиздат, 1981. – 210 с.

Засов А.В., Постнов К.А. Общая астрофизика – М.: Фразино, 2006. – 454 с.

Зельдович Я. Б., Новиков И. Д. Строение и эволюция Вселенной. – М.: Наука, 1975. – 736 с.

Крамаровский Я. М., Чечев В. Д. Синтез элементов во Вселенной. – М.: Наука, 1987. – 160 с.

Латыпов Н.Н., Бейлин В.А., Верешков Г.М. Вакуум, элементарные частицы и Вселенная. – М.: Изд. МГУ, 2001. – 226 с.

Линде А. Д. Физика элементарных частиц и инфляционная космология. – М.: Наука, 1990. – 276 с.

Лукаш В.Н., Михеева Е.В. Физическая космология. – М.: ФМЛ, 2010. – 404 с.

Окунь Л.Б. Физика элементарных частиц. – М.: Наука, 1988. – 272 с.

Яцків Я.С., Александров О.М., Вавилова І.Б. Загальна теорія відносності: випробування часом. – К.: ГАО НАН У., 2005. – 288 с.

Кайку Мічіо Гіперпростір. – Л.: Літопис, 2005. – 458 с.

Хлопов М.Ю. Основы космофизики. – М., 2004. – 368 с.

