

Для побудови моделі Всесвіту необхідно дати відповідь на таке запитання: «Чи має Всесвіт якусь межу у просторі?». Нескінченний і безмежний у просторі та часі Всесвіт привертає до себе увагу тим, що не має країв і містить нескінченну кількість зір та галактик. Але в такому вічному та безмежному Всесвіті виникають суперечності, які в астрономії називають **космологічними парадоксами**.

Існують три найбільш відомі космологічні парадокси: фотометричний, гравітаційний та «теплової смерті» Всесвіту.

Фотометричний парадокс був сформульований 1744 р. швейцарським астрономом Ж. Шезо та доповнений німецьким астрономом І. Ольберсом 1826 р. Коротко суть цього парадокса можна виразити в такому запитанні: «Якщо Всесвіт нескінченний, то чому вночі темно?». Здається, що на це запитання відповісти дуже просто, адже зміну дня і ночі вивчають у початковій школі. Але треба пам'ятати: над нічною поверхнею Землі світить безліч зір безмежного Всесвіту, які випромінюють нескінченну кількість енергії, тому освітлення від зір і галактик має бути не меншим за освітлення, яке створює Сонце. Проте з власного досвіду ми бачимо, що вночі небо набагато темніше, ніж удень. Математики запропонували таку модель Всесвіту, в якій можна спростувати фотометричний парадокс. *Всесвіт може бути безмежним, але скінченним*. В одновимірному просторі такий безмежний скінченний світ — це звичайне коло або будь-яка інша замкнута крива (рис. 2.1).

Космологія (космос і грец. *logos* — вчення) — розділ астрономії, в якому вивчають Всесвіт як ціле

Космологічні парадокси — суперечності, які виникають у вічному та безмежному Всесвіті

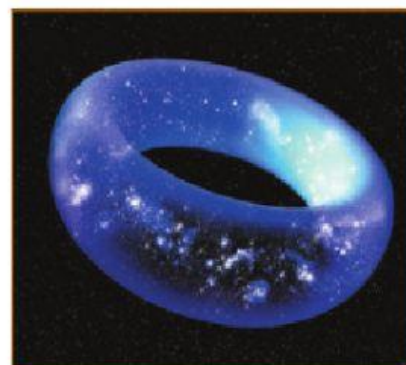
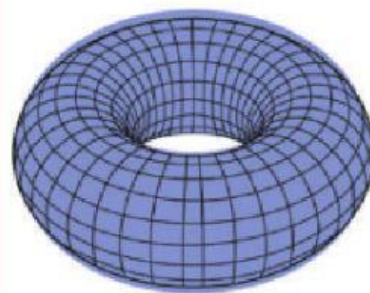
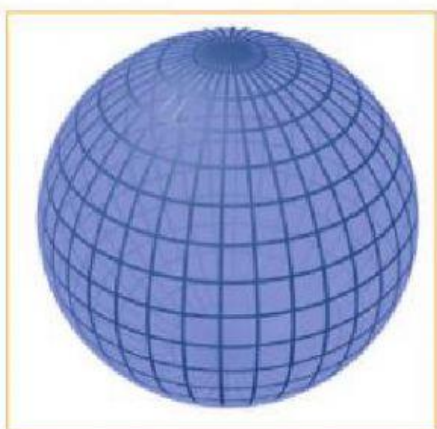


Рис. 2.1 Модель одновимірного простору Всесвіту



Замкнутий двовимірний простір — поверхня сфери, яка не має межі, але площа поверхні сфери є скінченною величиною (рис. 2.2).

Ми живемо у тривимірному просторі, і важко уявити собі такий замкнутий Всесвіт, який не має межі, але має скінченний об'єм і, отже, обмежену кількість зір і галактик. У такому Всесвіті немає центру, всі точки в ньому рівноправні й у всіх напрямках простір однорідний. На практиці важко перевірити, у якому просторі мешкають якісь істоти, і дізнатися, чи є простір



Рис. 2.2. Модель двовимірного простору Всесвіту

скінченним. Якщо простір замкнутий, то мандрівник, подорожуючи в одному напрямку, може здійснити навколосвітню подорож і повернутися в точку старту. В історії *земної цивілізації* першу таку подорож здійснив Магеллан, який довів, що поверхня Землі є замкнутим двовимірним простором. У тривимірному Всесвіті космонавти ніколи не зможуть завершити таку навколосвітню подорож, тому перевірку можна зробити тільки за допомогою теоретичних міркувань.

Гравітаційний парадокс — космологічна проблема, яка виникає із класичної теорії тяжіння і яку можна сформулювати таким чином: «У нескінченному Всесвіті з евклідовою

геометрією і ненульовою середньою густиною речовини гравітаційний потенціал усюди набуває нескінченних значень».

На даний момент цей парадокс не виникає, оскільки Ньютонівську теорію всесвітнього тяжіння, як з'ясувалося на початку ХХ ст., не можна застосовувати для опису сильних гравітаційних полів тяжіння (рис. 2.3) і, зокрема, розподілу нескінченної кількості речовини у безмежному просторі. У цих випадках треба використовувати теорію відносності Айнштейна.

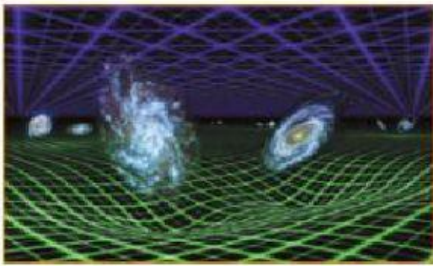


Рис. 2.3. Ньютонівська теорія тяжіння непридатна для розрахунку сильних полів тяжіння

Парадокс теплової смерті. Теплова смерть — термін, що описує кінцевий стан будь-якої замкнутої термодинамічної системи (рис. 2.4). При цьому ніякого направленого обміну енергією спостерігатися не буде, оскільки всі види енергії перейдуть в теплову. Термодинаміка розглядає систему, що перебуває в стані теплової смерті як систему, в якій термодинамічна ентропія максимальна.

Висновок про теплову смерть Всесвіту був сформульований Р. Клаузіусом 1865 р. на основі другого закону термодинаміки. За цим законом,

3

Історія розвитку уявлень про Всесвіт. Походження й еволюція Всесвіту

Астрономічні дослідження, що проводились у ХХ ст., допомогли астрономам збагнути розлітання галактик, яке свідчить про те, що сам Всесвіт не залишається сталим у часі — він змінює свої параметри. Якщо відстань між галактиками зараз збільшується, то раніше вони розташовувались ближче одна до одної. За допомогою сталої Габбла можна підрахувати, коли всі галактики до початку розширення могли перебувати в одній точці. Моментом початку розширення Всесвіту є **Великий Вибух**, який пов'язаний із віком T Всесвіту: $T = 1/H$.

На перший погляд здається, що для побудови теорії еволюції Всесвіту велике значення має визначення місця Великого Вибуху (рис. 3.1). Якби Великий Вибух був процесом, який нагадує вибух

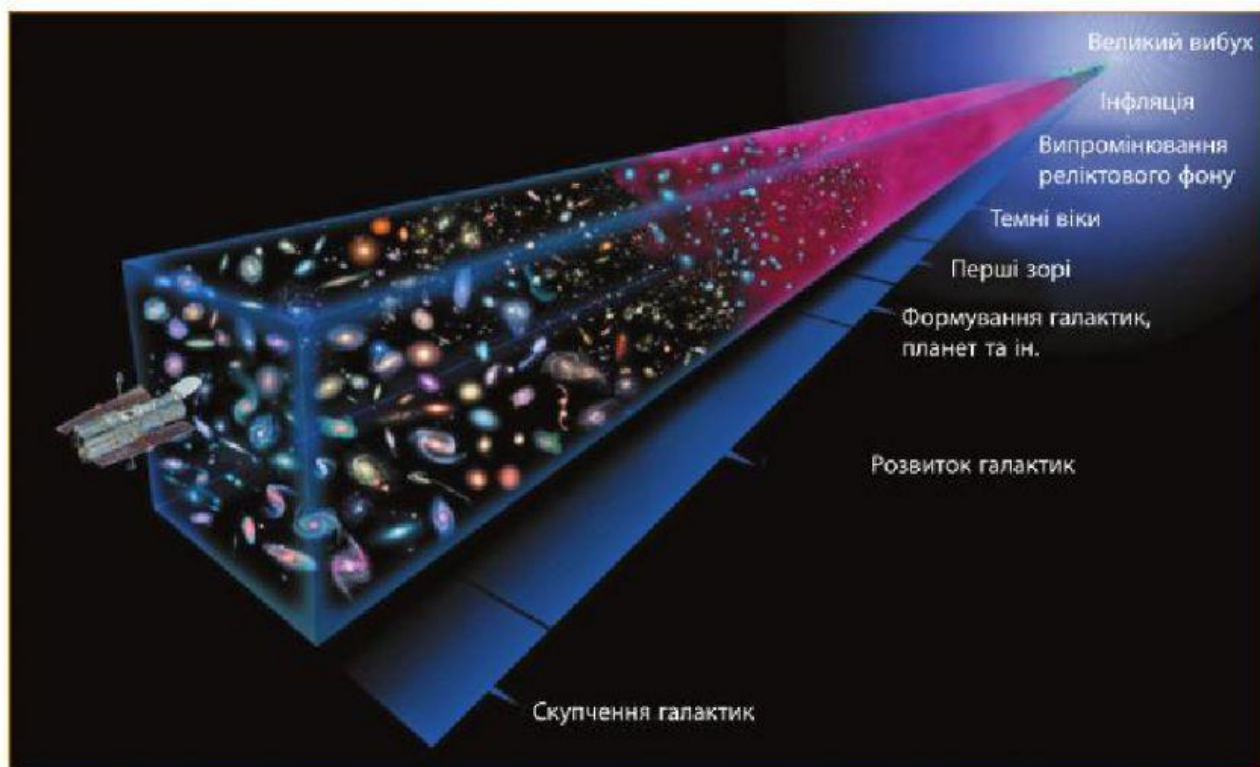


Рис. 3.1. Комп'ютерна модель розвитку Всесвіту від Великого вибуху до нашого часу

Великий вибух — термін, за допомогою якого об'єднано сучасні уявлення про початкові стадії розвитку Всесвіту, що пояснюють його еволюцію і властивості

бомби, то можна було б визначити місце цієї події. Насправді розширення Всесвіту включає не тільки розлітання самих галактик відносно космічного простору, а й зміну параметрів самого Всесвіту. Іншими словами, галактики не летять відносно решти Всесвіту, тому що сам Всесвіт теж розширюється. Таким чином, конкретного місця, де стався Великий Вибух, у Всесвіті не існує, так само, як немає центру, від якого віддаляються галактики.

За сучасними даними, стала Габбла $H \approx 70 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$, тобто Великий Вибух міг відбутися приблизно 15 млрд років тому. Якщо врахувати, що вік нашої Галактики не може бути більший за вік найстаріших кулястих зоряних скупчень, що існують уже понад 13 млрд років, то цю цифру можна також вважати за нижню межу віку нашого Всесвіту.

Головні ери в історії Всесвіту. Всесвіт на початку існування мав настільки маленькі розміри, що тоді не було ані галактик, ані зір і навіть ще не існували елементарні частинки. Густина і температура новонародженого Всесвіту досягали таких фантастичних значень, що вчені навіть не можуть визначити, у якому стані при цьому перебувала матерія. Цей початковий момент народження Всесвіту називають **сингулярністю** (від лат. *єдиний*). Потім густина і температура Всесвіту почали знижуватись, стали

В основу сучасної астрономічної картини світу щодо еволюції Всесвіту покладено **модель гарячого Всесвіту**

будь-яка фізична система, що не обмінюється енергією з іншими системами (для Всесвіту в цілому такий обмін, очевидно, виключений), прагне до найбільш вірогідного рівноважного стану — до так званого стану з максимумом ентропії. Такий стан відповідав би тепловій смерті Всесвіту.

Ще до створення сучасної космології були зроблені численні спроби спростувати висновок про теплову смерть Всесвіту. Найбільш відома з них флуктуаційна гіпотеза Л. Больцмана (1872), відповідно до якої Всесвіт одвічно перебуває в рівноважному ізотермічному стані, але за законом випадку то в одному, то в іншому його місці інколи відбуваються відхилення від цього стану; вони відбуваються тим рідше, чим більшу область захоплюють і чим значнішим є ступінь відхилення.

утворюватися елементарні частинки, атоми і галактики. Усю історію нашого Всесвіту можна розділити на чотири ери — *адронна, лептонна, випромінювання та речовини* (див. таблицю).

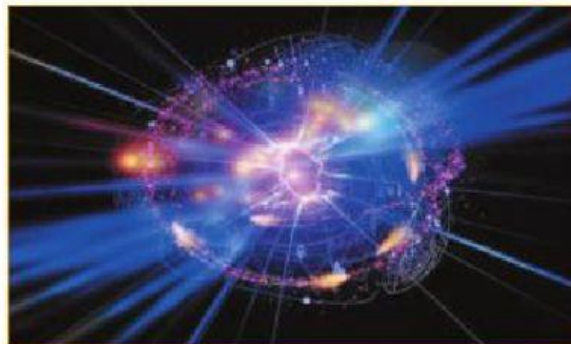


Рис. 2.4. Теплова смерть — термін, що описує кінцевий стан будь-якої замкнутої термодинамічної системи

Ера Всесвіту	Вік Всесвіту, років	Фази еволюції	Температура, К	Густина, кг/м ³
Речовини	$1,5 \cdot 10^{10}$	Сучасна епоха	2,7	$5 \cdot 10^{-27}$
	$1,2 \cdot 10^{10}$	Виникнення життя на Землі		
	10^{10}	Формування Сонячної системи		
	$6 \cdot 10^9$	Утворення перших зір		
	$5 \cdot 10^9$	Утворення нашої Галактики		10^{-26}
	10^9	Квазари		
	$3 \cdot 10^8$	Поява хмар водню та гелію		
	10^8	Утворюються атоми Гідрогену та Гелію		10^{-13}
Випромінювання	$3 \cdot 10^5$	Формування речовини. Всесвіт стає нейтральним і темним	3	10^{-10}
	300 с	Кінець ери випромінювання	10	
Лептонна	10 с	Утворюються ядра Дейтерію та Гелію	10^4	10^{16}
	10^{-4} с	Електрони і позитрони в стані теплової рівноваги з випромінюванням	10^{10}	
Адронна	10^{-7} с	Розділення електромагнітної та слабкої взаємодії	10^{15}	
	10^{-10} с	Утворення нейтронів і протонів	10^{27}	
	10^{-32} с	Відділення сильної взаємодії		
	10^{-43} с	Відділення сил гравітації	10^{32}	10^{95}
Сингулярність	0	Усі чотири фундаментальні сили об'єднані в єдину. Розміри Всесвіту наближуються до нуля		



Рис. 3.2. Реліктове випромінювання — кванти світла, що утворилися 15 млрд років тому. Вони відділилися від елементарних частинок і почали самостійне поширення у Всесвіті

Реліктове фонове випромінювання (рис. 3.2, 3.4). Ті кванти електромагнітного випромінювання, що відірвалися від елементарних частинок в еру випромінювання, доходять до Землі звідусіль і відповідають електромагнітному випромінюванню чорного тіла з температурою 2,7 K (рис. 3.3).

На початку існування кванти мали велику енергію, тому випромінювання відбувалося у височастотній частині спектра електромагнітних хвиль у гамма-діапазоні. Із часом гамма-кванти втрачали енергію, тому довжи-

на електромагнітних хвиль збільшувалася, і через 10^6 років після Великого Вибуху максимум випромінювання припадав уже на видиму частину спектра — тоді *молодий Всесвіт* справді мав вигляд яскравої вогняної кулі та був подібний до вибуху ядерної бомби. Через 10 млн років максимум випромінювання вже розташовувався в інфрачервоній частині спектра, а через 14 млрд років середня

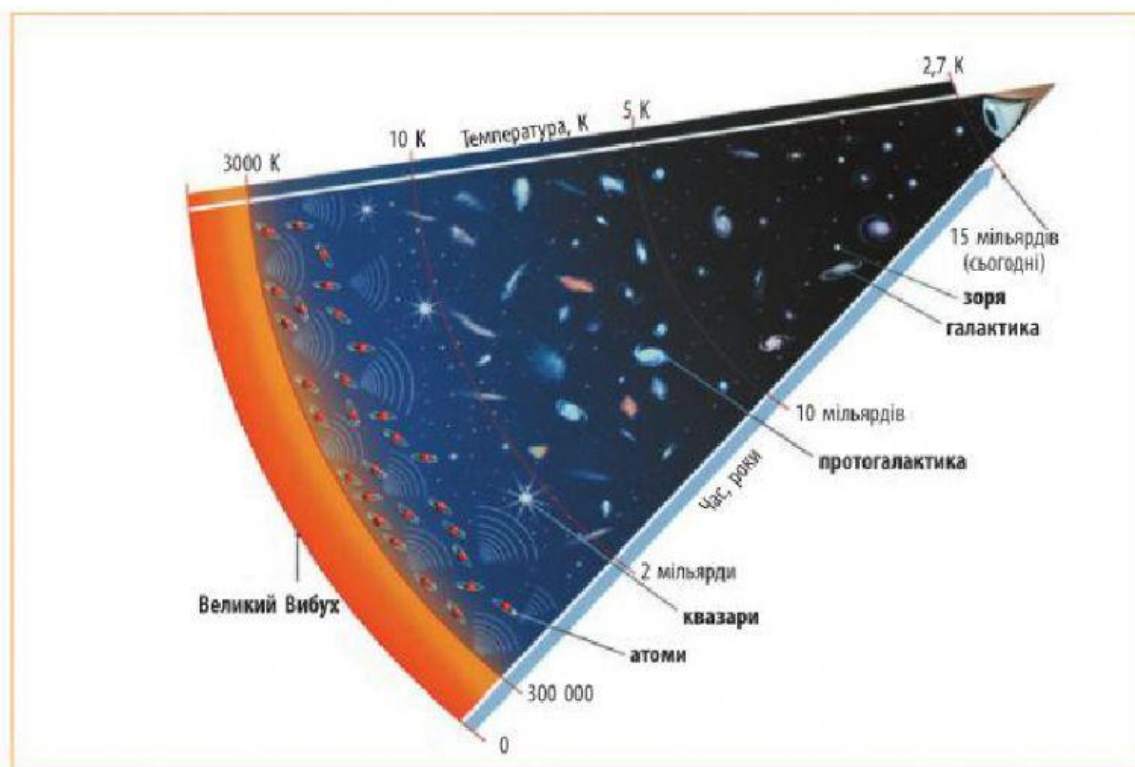


Рис. 3.3. Чим далі від Землі розміщується космічний об'єкт, тим молодшим ми його бачимо, адже світло від нього досягає поверхні Землі через мільярди років. На межі видимої частини Всесвіту з відстані 10 млрд св. років надходить випромінювання, яке утворилося за часів Великого Вибуху. На відстані 5 млрд св. років ми бачимо квазари, з яких пізніше формуються галактики

температура Всесвіту зменшилася до 2,7 К, тому зараз максимум випромінювання перебуває в *радіодіапазоні на хвилі завдовжки 1 мм*. Інтенсивність і частота такого випромінювання не залежать від напрямку, і це свідчить про те, що середня температура Всесвіту повсюди однакова. Цікаво, що передбачив існування гарячого раннього Всесвіту ще 60 р. тому уродженець міста Одеси Г. Гамов (США), але зареєстрували ці реліктові електромагнітні хвилі тільки в 1965 р.

Майбутнє Всесвіту. Гравітаційна взаємодія речовини в майбутньому може зменшити швидкість розширення Всесвіту. Виявляється, якщо середня густина Всесвіту має критичне значення $5 \cdot 10^{-27} \text{ кг/м}^3$, а стала Габбла $H \approx 70 \text{ км/(с} \cdot \text{Мпк)}$, розширення може відбуватися вічно. Розрахунки показують, що майбутня доля нашого Всесвіту залежить від значення справжньої середньої густини щодо критичної густини ρ_0 . Можуть бути три сценарії майбутнього розвитку подій:

- 1) $\rho < \rho_0$;
- 2) $\rho > \rho_0$;
- 3) $\rho = \rho_0$.

Розгляньмо ці моделі можливої еволюції нашого світу:

1. Якщо середня густина Всесвіту $\rho < \rho_0$, то галактики будуть розлітатися вічно, і в майбутньому температура фонового випромінювання поступово буде знижуватись, наближуючись до абсолютного нуля, а максимум випромінювання з часом буде зміщуватись у сантиметровий і метровий діапазони електромагнітних хвиль (рис. 3.5). Такий Всесвіт називають **відкритим**, він не має межі у просторі й може існувати вічно, поступово перетворюючись на ніщо.

2. Якщо в космосі виявиться значна прихована маса і середня густина буде $\rho > \rho_0$, тоді розширення Всесвіту через деякий час припиниться. Такий Всесвіт називають **закритим** — він не має межі у просторі, але має *початок і кінець у часі* (рис. 3.6).

Через кілька мільярдів років розбігання галактик може зупинитися, а потім почнеться стискування Всесвіту, тому що гравітаційна сила змусить галактики зближуватись. Зближення галактик призведе до трагічних наслідків для живих організмів, оскільки енергія

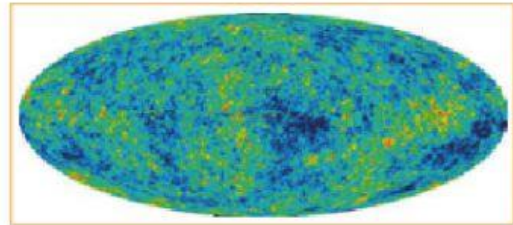


Рис. 3.4. Анізотропія реліктового випромінювання за даними супутника WMAP

Реліктове випромінювання — випромінювання Всесвіту, яке домінує в діапазоні довжин хвиль від міліметрів до метра

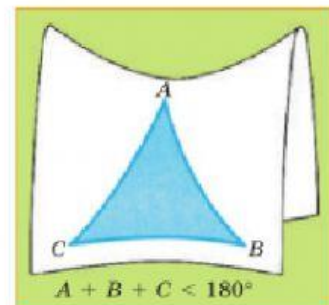


Рис. 3.5. У відкритому Всесвіті справедлива неевклідова геометрія, коли сума кутів у трикутнику менша від 180°

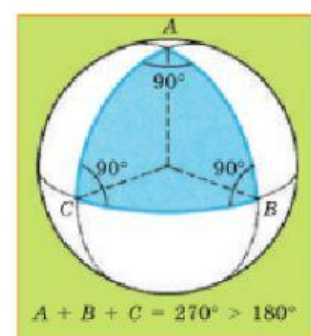


Рис. 3.6. Для закритого Всесвіту є правильною неевклідова геометрія, коли сума кутів у трикутнику більша за 180°

фонового випромінювання і температура Всесвіту будуть зростати (рис. 3.7). Небо почне світитися спочатку червоним кольором, а потім стане синім. Температура зросте настільки, що всі живі істоти загинуть, потім зникнуть зорі, планети, елементарні частинки, і Всесвіт знову перетвориться на речовину з надзвичайно великою густиною.

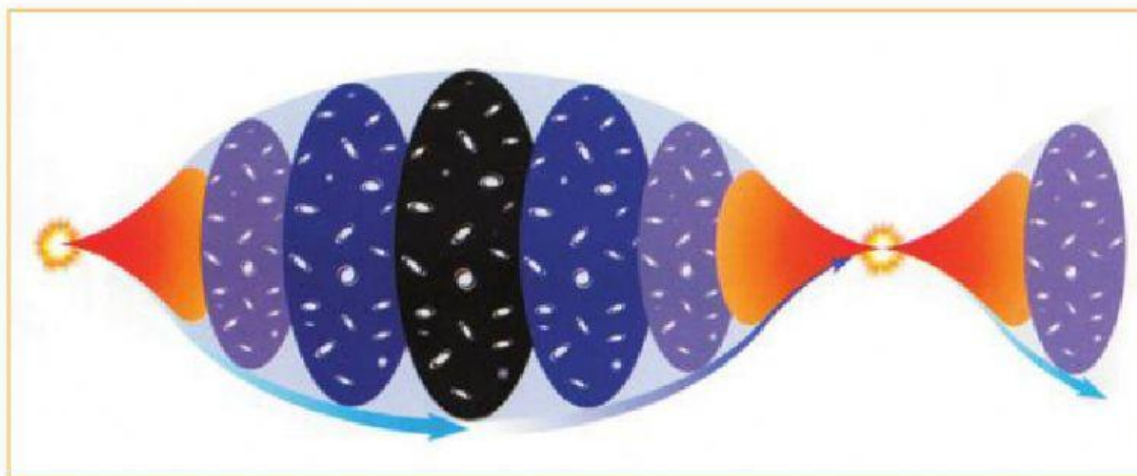


Рис. 3.7. Еволюція закритого Всесвіту. Такий світ збільшується до певних максимальних розмірів, після чого галактики почнуть зближуватись. Початок і кінець такого Всесвіту мають нескінченно велику температуру і густину

3. Існує також імовірність того, що середня густина Всесвіту дорівнює критичній густині $\rho = \rho_0$. У цьому випадку безмежний та нескінченний Всесвіт має нульову кривизну, і для нього справедлива геометрія Евкліда (рис. 3.8).

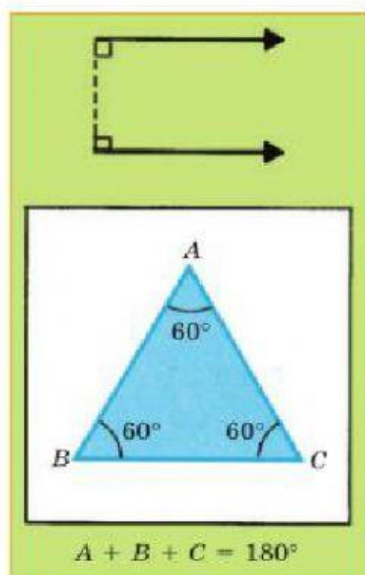


Рис. 3.8. У геометрії Евкліда паралельні прямі не перетинаються, а сума кутів у трикутнику дорівнює 180°

Галактики будуть розлітатися вічно, температура Всесвіту буде вічно наближуватися до абсолютного нуля... Цей сценарій еволюції цікавий ще й тим, що при ньому загальна енергія Всесвіту залишається рівною нулю: $E_k + E_p = 0$.

Тобто якщо вважати потенціальну енергію тяжіння негативною, а кінетичну енергію руху — позитивною, то Всесвіт міг виникнути з нічого у фізичному вакуумі як дивовижне збурення, тому з часом він теж може перетворитися на ніщо.

Сучасні спостереження підтверджують існування у Всесвіті прихованої маси (так звана темна матерія), яка зосереджена в тілах, що випромінюють незначну енергію у вигляді електромагнітних хвиль — чорні діри, пульсари, нейтринне випромінювання, гравітаційні хвилі та ін. Астрономи, які займаються проблемами космології, запропонували гіпотезу щодо існування нового класу елементарних частинок, яким дали таку умовну назву — Слабко

Взаємодіючі Масивні Частинки (СВМЧ). Такий Всесвіт нагадує казкову птицю Фенікс, яка періодично згорає, а потім із попелу відроджується молодого.

СПОСТЕРЕЖНІ ОСНОВИ КОСМОЛОГІЇ. ІСТОРІЯ РОЗВИТКУ УЯВЛЕНЬ ПРО ВСЕСВІТ. ПОХОДЖЕННЯ Й ЕВОЛЮЦІЯ ВСЕСВІТУ

1 Як визначити вік Всесвіту?

2 Установи відповідність між космологічними парадоксами та їх суттю.

1	Фотометричний парадокс	А	У нескінченному Всесвіті з евклідовою геометрією і ненульовою середньою густиною речовини гравітаційний потенціал усюди набуває нескінченних значень
2	Гравітаційний парадокс	Б	Будь-яка фізична система, що не обмінюється енергією з іншими системами прагне до стану з максимумом ентропії
3	Парадокс теплової смерті	В	Якщо Всесвіт нескінченний, то чого вночі темно?

3 Як ти вважаєш, у якому стані перебував Всесвіт у момент Великого вибуху?

4 Що називають сингулярністю?

5 Що таке реліктове випромінювання?

6 Що розуміють під закритою та відкритою моделями Всесвіту?