

Ю. СТЕПАНОВСЬКИЙ

## УЧЕНИЙ І ВСЕСВІТ

## До 130-річчя від дня народження Альберта Ейнштейна

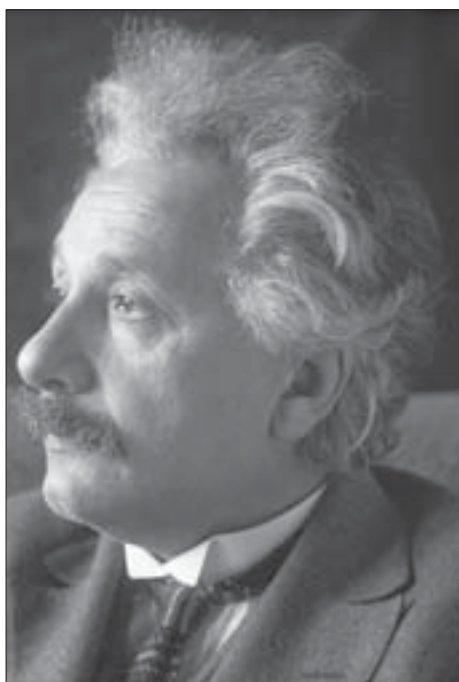
*Минуло три роки відтоді, як ЮНЕСКО оголосила 2005-й Міжнародним роком фізики на честь епохальних робіт Альберта Ейнштейна з фізики, виконаних у 1905 р. У зв'язку з цим 2–6 жовтня 2005 р. в Одесі відбувся масштабний з'їзд «Фізика в Україні». Організаторами виступили НАН України, МОН України й Українське фізичне товариство. Учасники з'їзду заслухали лекції, присвячені А. Ейнштейну та його безцінному внеску у фізику, а також доповіді на тему сучасної фізики і фізичних досліджень в Україні. На з'їзді відбулася презентація ґрунтовної монографії «Загальна теорія відносності: випробування часом» (автори Я.С. Яцків, О.М. Александров, І. Б. Вавилова та інші).*

*Нинішній, 2009 рік, ЮНЕСКО оголосила Міжнародним роком астрономії на честь 400-ліття нової ери, розпочатої Галілео Галілеєм, який уперше спрямував у небо свою зорову трубу. У Рік астрономії природно говорити про космос, Всесвіт, космологію та її дослідників. Тому проаналізуємо внесок А. Ейнштейна в цей науковий напрям, щоб пересвідчитися, що без космологічної сталої, про введення якої у фізику вчений глибоко жалкував, було б неможливо пояснити спостережуване нині розширення Всесвіту з прискоренням.*

Альберт Ейнштейн народився 14 березня 1879 р. у м. Ульмі (Німеччина) в нерелігійній єврейській сім'ї. У 1880 р. родина переїздить до Мюнхена. У 1896 р. Ейнштейн відмовляється від німецького громадянства. Упродовж 1896–1900 рр. він студент Цюрихського політехнікуму. У 1901 р. Альберт приймає швейцарське громадянство. З 1902 до 1906 р. він працює технічним експертом третього класу в патентному бюро в Берні, а протягом 1906–1909 рр. — технічним експертом другого класу. З 1909 до 1911 р. Ей-

нштейн — доцент Цюрихського університету, а з 1911 до 1912 р. — професор теоретичної фізики німецького університету в Празі. Упродовж 1912–1914 рр. — професор теоретичної фізики у Федеральному технологічному інституті (колишньому Політехнікумі) в Цюриху. З 1914 р. А. Ейнштейн — професор Берлінського університету, директор Фізичного інституту ім. кайзера Вільгельма, член Пруської академії наук. У 1932 р. ученого призначають професором в Інституті вищих досліджень у Принстоні (штат Нью-

© СТЕПАНОВСЬКИЙ Юрій Петрович. Кандидат фізико-математичних наук. Провідний науковий співробітник ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України. 2009



Альберт Ейнштейн (1930)

Джерсі, США). У 1933 р. він виходить з Пруської академії наук і емігрує в США, а в 1940 р. одержує американське громадянство. 18 квітня 1953 р. А. Ейнштейн помирає в лікарні в Принстоні від аневризми черевної аорти. На його прохання тіло кремували, а прах розвіяли в невідомому місці.

«Пробач мені, Ньютон!» — писав А. Ейнштейн у 1949 р. у своїх «Автобіографічних нотатках». Теорія тяжіння Ньютона, така проста, красива і, здавалося б, непорушна, виявилася лише першим наближенням до істини. На зміну їй прийшла теорія тяжіння Ейнштейна, яку він назвав «Загальною теорією відносності». Учений вважав її основним науковим результатом свого життя. Згідно з цією теорією, матерія (речовина) змінює геометрію простору-часу, і рух електронів, небесних тіл або світла в цьому викривленому просторі-часі відбувається за законами геометрії. Тільки в листопаді 1915 р. А. Ейнштейну вдалося остаточно сформулювати рівняння своєї теорії.

4, 11, 18 і 25 листопада 1915 р. учений виступив із чотирма доповідями на засіданнях Пруської академії наук у Берліні (вони були опубліковані тиждень потому в «Доповідях Королівської Пруської академії наук»). У перших двох доповідях обговорено загальні питання теорії, у третій пояснено аномалії в русі перигелію Меркурія (43"/100 років) і правильно розраховано відхилення променя світла гравітаційним полем Сонця (1,75"), що виявилось вдвічі більше, ніж помилковий результат, отриманий Ейнштейном у 1911 р. І, нарешті, 25 листопада А. Ейнштейн повідомив про отримання остаточних рівнянь тяжіння. Теорія була завершена. Ось один із захопливих відгуків про неї А. Зоммерфельда (1921 р.): «... ідеальні позитивні якості теорії і суб'єктивні заслуги Ейнштейна залишаються нечуваними і не можуть ні з чим зрівнятися. Зі сміливістю і логічністю філософського розуму, яких ніколи раніше не помічали у вченого-природознавця, з математичною потужністю, що викликає в пам'яті імена Гауса і Рімана, з безпомилковим розумінням фізичної дійсності, яке він продемонстрував і в інших галузях фізики, Ейнштейн протягом десяти років зводив будівлю своєї теорії, перед якою навіть ми, з року в рік напружено стежачи за його роботою, сьогодні стоїмо вражені і приголомшені...».

#### ЕЙНШТЕЙН І ЧОРНІ ДІРИ

Для того, щоб пояснити аномалії в русі перигелію Меркурія і розрахувати відхилення променя світла гравітаційним полем Сонця, А. Ейнштейну було достатньо знайти тільки перші поправки до теорії Ньютона. У 1916 р. німецький астроном Карл Шварцшильд (1873–1916) уперше отримав точне рішення рівнянь загальної теорії відносності Ейнштейна, що виражає узагальнений закон всесвітнього тяжіння Ньютона для статичного сферично-

симетричного випадку. Робота Шварцшильда заклала підґрунтя для сучасної теорії чорних дір. Сам Ейнштейн висловлював великий сумнів щодо існування чорних дір. Проте сьогодні вчені переконані в тому, що майже в центрі кожної галактики є чорна діра з масою від 106 до 1010 мас Сонця. Астрофізики знайшли більше як 100 компактних об'єктів — кандидатів у чорні діри. Усупереч думці А. Ейнштейна, роль чорних дір в еволюції космосу загальноно визнана.

Варто зазначити, що ніякого «шварцшильдівського радіуса», а отже, і жодних «чорних дір» в оригінальній роботі Шварцшильда не було (він вибрав радіальну змінну  $r$  таким чином, що особливість у знайденому ним рішенні була тільки на початку координат). Але, обговорюючи рішення Шварцшильда в 1917 р., Давид Гільберт і незалежно від нього Герман Вейль записали рішення Шварцшильда в такому вигляді, у якому воно існує сьогодні.

Знамениту роботу К. Шварцшильда А. Ейнштейн представив Пруській академії наук 13 січня 1916 р. Сам Шварцшильд також був членом Академії, але в цей час служив у війську і перебував на російському фронті, де й виконав відповідні обчислення. На фронті він вивчив загальну теорію відносності Ейнштейна (тому пощастило: як швейцарський громадянин, після закінчення середньої школи він теж мав служити в армії, але його звільнили через плоскостопість). 11 травня 1916 р. Карл Шварцшильд помер від хвороби, якою заразився на фронті. Пруська академія надрукувала некролог «Пам'яті Карла Шварцшильда», написаний Ейнштейном: *«У теоретичних роботах Шварцшильда особливо вражають упевнене володіння математичними методами дослідження і та легкість, з якою він досягає суті астрономічної або фізичної проблеми. Рідко трапляються такі глибокі математичні пізнання в поєднанні зі здоровим глуздом і такою гнучкістю мислення, як у*



Альберт Ейнштейн (1904)

*нього. ... Невблаганна смерть забрала його, але праці житимуть і приносять плоди тій науці, якій він віддав усі свої сили».*

#### КОСМОЛОГІЯ І ЗАГАЛЬНА ТЕОРІЯ ВІДНОСНОСТІ

8 лютого 1917 року на засіданні Пруської академії наук А. Ейнштейн доповів про свою нову роботу «Питання космології і загальна теорія відносності». Він уже неодноразово ставав революціонером у науці, але на цей раз виявився не на висоті. Учений був переконаний, що *Всесвіт має бути однорідним, ізотропним і статичним*. Новаторство полягало в тому, що А. Ейнштейн вважав об'єм Всесвіту кінечним, тобто *просторово-замкненим*. Видатний фізик шукав таке рішення своїх рівнянь гравітації 1915 року, яке б описувало Всесвіт, рівномірно заповнений речовиною, як тривимірну сферу радіуса  $R$  у чотиривимірному просторі. Але таких рішень у рівнянь Ейнштейна не було. Тоді він штучно змінив свою теорію так, щоб вона мала потрібні йому рішення, увівши у свої рівняння новий доданок і нову константу  $\Lambda$ , названу незабаром космологічною сталою, через яку і виражався «радіус світу»  $R$  за допомогою формули  $R^2 = c^2/\Lambda$ . Всесвіт Ейнштейна був

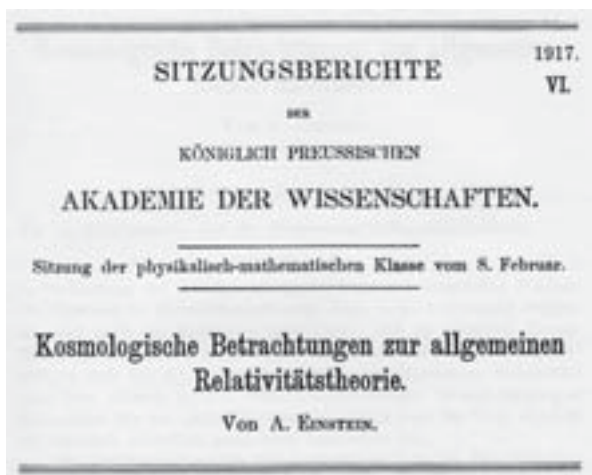


Рис.1. Титульна сторінка праці Ейнштейна з космології (1917)

малопривабливий за своїми фізичними властивостями, але виявилось, що його рівняння мають набагато цікавіші рішення, які незабаром знайшли В. де Сіттер, А.А. Фрідман і Ж. Леметр.

#### А. ЕЙНШТЕЙН І ЙОГО ПОСЛІДОВНИКИ

Нідерландський математик, астроном і космолог **Віллем де Сіттер** (1872–1934) у 1916–1917 рр. опублікував серію статей, присвячених астрономічним наслідкам загальної теорії відносності Ейнштейна. Екземпляри перших робіт Ейнштейна із загальної теорії відносності де Сіттер надіслав із Лейдена до Кембриджа Артурові Еддінгтону. Статті де Сіттера були опубліковані в Лондоні, і, завдячуючи йому, в Англії виник інтерес до теорії Ейнштейна. У 1919 р. Еддінгтон організував дві англійські експедиції, які в травні 1919 р. підтвердили (як тоді вважалося) передбачене А. Ейнштейном відхилення променя світла гравітаційним полем Сонця, і новою теорією Ейнштейна зацікавилися в усьому світі. У 1917 р. де Сіттер опублікував роботу, у якій він отримав статичне рішення рівнянь Ейнштейна з відмінною від нуля космологічною сталою і рівною нулю густиною речо-

вини. Всесвіт де Сіттера — це світ, позбавлений матерії, метрично однорідний простір ненульової кривизни, напрочуд простий «конічний перетин» п'ятивимірного псевдоевклідового простору. Рішення де Сіттера завдавало удару по основній ідеї Ейнштейна: розподіл матерії визначає геометрію простору-часу. Матерії не було зовсім, а геометрія виявлялася цілком визначеною.

У 1933 р. все майно А. Ейнштейна в Німеччині було конфісковано. Віллем де Сіттер від імені своїх колег запропонував ученому фінансову допомогу. 5 квітня 1933 р. Ейнштейн відповів: *«У такий час людині дано пізнати своїх істинних друзів. Щиро вдячний вам за вашу готовність прийти на допомогу. Я цілком забезпечений, так що не тільки утримую себе і свою сім'ю, але й навіть допомагаю іншим «триматися на поверхні води». Звичайно, з Німеччини я нічого не можу врятувати, тому що проти мене висунуто звинувачення в державній зраді. Фізіолог Жак Леб якось сказав мені в розмові, що політичні вожді повинні неодмінно бути патологічними типами: нормальна людина не витримала б такої колосальної відповідальності за такої слабкої здатності передбачати наслідки своїх рішень і вчинків. Тоді це звучало перебільшенням, але повною мірою справедливо щодо сьогоденної Німеччини».*

Уже живучи в Принстоні, А. Ейнштейн у 1934 р. відгукнувся на смерть де Сіттера:

*«Професор де Сіттер був одним із найвидатніших учених у галузі астрономії. ... Де Сіттер зробив значний внесок у розв'язання важливої космологічної проблеми про структуру простору в теорії відносності. Його смерть є важкою втратою для астрономії і всього наукового життя Голландії».*

Німецький математик **Герман Вейль** (1885–1955) захопився загальною теорією відносності Ейнштейна відразу ж після її

оприлюднення. У 1918 р. вийшла його книга «Простір, час, матерія», присвячена теорії Ейнштейна. У тому ж році А. Ейнштейн писав у рецензії на книгу Вейля: *«Окремі частини цієї книги мимоволі хочеться перечитувати знову і знову, бо кожна її сторінка написана надзвичайно впевненою рукою майстра, який досконало вивчив свою справу. Чудово, що новою галуззю науки заопікувався такий видатний математик. Він зумів злити воедино математичну строгість і наочність. ... особливо вражає те, як у руках Вейля найскладніші речі стають простими і зрозумілими. ... Кожному, хто забажає сам попрацювати в цій сфері, рецензована книга надасть неоціненну послугу, не кажучи вже про ту радість, яку принесе її вивчення».*

Вейль першим зрозумів, що Всесвіт де Сіттера імовірно нестатичний, ніж статичний, оскільки в ньому повинен існувати червоний зсув, що збільшується з відстанню, а пробні тіла повинні розбігатися. Вейль написав про це в п'ятому виданні своєї книги (1923 р.). Сьогодні рішення рівнянь Ейнштейна, знайдене де Сіттером, застосовують для опису Всесвіту в найдраматичніші миті його еволюції, у період інфляційного розширення.

**Олександр Фрідман** (1888–1925), російський і радянський математик та геофізик, був першим, хто в 1922 р. знайшов рішення рівнянь гравітації Ейнштейна 1917 року, що описують нестационарний Всесвіт, рівномірно заповнений речовиною. (Під час Першої світової війни, у 1914 році, Фрідман пішов добровольцем в авіаційний загін. На відміну від інших льотчиків, він обчислював у думці кути метання бомб з аероплана і перевіряв свої розрахунки на практиці. «Сьогодні літає Фрідман», – говорили німецькі солдати, коли бомби лягали точно в намічену ціль). Георгій (Джордж) Гамов у 1923–1924 рр. був студентом Петербурзького університету і слухав курс лекцій Фрідмана «Математичні



А. Ейнштейн у Принстоні

підстави теорії відносності» (передбачалося, що Гамов під керівництвом Фрідмана виконає дипломну роботу з космології, але передчасна смерть Фрідмана завадила цьому). Як безпосередній свідок подій Гамов писав про роботу свого вчителя: *«Фрідман зрозумів, що це відкриває цілий новий світ залежних від часу всесвітів: тих, що розширюються, колапсуються і пульсують... Фрідман написав про свої знахідки Ейнштейну, але не отримав жодної відповіді. Трапилося так, що фізик-теоретик із Петербурзького університету професор Юрій Крутков отримав дозвіл на поїздку до Берліна, що було зовсім не так просто зробити в перші післяреволюційні роки в Росії. Фрідман попросив Круткова спробувати зустрітися з Ейнштейном і поговорити з ним про це. У результаті розмови Ейнштейн написав Фрідману короткий, але децю сердитий лист, погодившись із його аргументами. Фрідман опублікував свою статтю в 1922 р. в німецькому журналі «Zeitschrift für Physik», відкривши, таким чином, нову епоху в космології».*

У цій статті Фрідман розглянув світ із позитивною сталою кривизною (що являє собою таку ж тривимірну сферу радіуса  $R$  у чотиривимірному просторі, яку розглядав Ейнштейн), а в наступній статті, опублікованій у тому самому журналі в 1924 р., він розглянув світ зі сталою негативною кривизною (аналогічною простору Лобачевського). Прочитавши першу статтю, А. Ейнштейн розкритикував її як помилкову. Після того як Ю.А. Круткову насилу вдалося переконати Ейнштейна в тому, що він не мав рації, вчений написав ще один короткий лист (1923 р.) у «Zeitschrift für Physik», у якому визнав правоту Фрідмана. Ось він:

**До роботи А. Фрідмана «Про кривизну простору»**

*«У попередній замітці я піддав критиці названу вище роботу. Проте моя критика, як я переконався з листа Фрідмана, повідомленого мені паном Крутковим, ґрунтувалася на помилці в обчисленнях. Я вважаю результати Фрідмана правильними і такими, що проливають нове світло. Виявляється, що рівняння поля допускають разом із статичними також і динамічні (тобто змінні щодо часу) центрально-симетричні рішення для структури простору».*

Теорію Фрідмана про Всесвіт, що розширюється, експериментально підтвердив американський астроном Едвін Хаббл (1889–1953). У 1929 р. Хаббл зробив відкриття: що далі від нас галактика, то більшого червоного зсуву зазнає світло, що йде від неї. Пояснюючи цей червоний зсув ефектом Доплера, тобто тим, що галактика віддаляється від нас, Хаббл установив закон пропорційності між швидкістю віддалення галактики і відстанню до неї

$$\text{Швидкість віддалення галактики} = H_0 \times \text{Відстань до галактики}$$

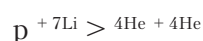
Сучасне значення постійної Хаббла  $H_0 = 1/\tau_0$ , де  $\tau_0 = 13,7 \pm 0,7$  мільярдів років — час, що приймають за приблизний вік Всесвіту.

У 1927 р. бельгійський священник, астроном і математик **Жорж Леметр** (1894–1966) незалежно від Фрідмана, з роботами якого він не був знайомий, вирішив рівняння Ейнштейна, що описують нестационарний Всесвіт. У 1936 р. Леметра обрано членом Папської академії наук у Ватикані, а з 1960 до 1964 р. він був її президентом. Леметр уперше висловив припущення про дуже високу температуру матерії на найперших етапах розширення і про збереження певних слідів цієї ранньої епохи в нинішньому Всесвіті. Він добре розумів важливість введення космологічної сталої в рівняння Ейнштейна і вважав, що «космологічний член» у рівняннях слід зберегти. Проте сам А. Ейнштейн не погоджувався з Леметром. Він писав у 1949 р.: «Що ж до аргументів, що наводить Леметр на користь так званого «космологічного члена» в рівняннях гравітації, то я повинен зазначити, що за сучасного рівня наших знань ці аргументи не видаються мені достатньо переконливими.

*Введення такого члена означає відмову від логічної простоти теорії, відмова, яка, на мій погляд, була б неминучою лише в тому разі, якщо б не було причин сумніватися в істотно статичній природі простору. Після відкриття Хабблом «розширення» зоряної системи і після того, як Фрідман показав, що з рівнянь без космологічного члена випливає можливість існування середньої (позитивної) густини матерії у Всесвіті, що розширюється, мені здається, що з теоретичного погляду введення такого члена сьогодні необґрунтоване».*

Георгій (Джордж) **Гамов** (1904–1968) — спочатку радянський, а потім американський фізик і астрофізик — народився в Одесі, навчався спочатку в Новоросійському (Одеса), а потім у Петербурзькому університеті. Виїхавши в 1933 р. на Сольвеевський конгрес у Брюсселі, в СРСР не повернувся. У 1934 р. емігрував у США.

У 1928 р. Г. Гамов пояснив альфа-розпад як тунельний ефект у квантовій механіці. За його ініціативою, у Кембриджі (досліди Джона Кокрофта і Ернеста Уолтона в травні 1932 р.) і Харкові (в УФТІ досліди проводила «високовольтна бригада» в складі К.Д. Синельникова, А.І. Лейпунського, А.К. Вальтера і Р.Д. Латишева в жовтні 1932 р.) були проведені експерименти з розщеплення ядра  ${}^7\text{Li}$  протонами:



Ці досліди не тільки довели справедливість теорії Гамова, але й були першим експериментальним підтвердженням формули Ейнштейна  $E=mc^2$ . (У 1951 р. Кокрофт і Уолтон отримали Нобелівську премію з фізики «за підтвердження закону Ейнштейна, що стосується еквівалентності маси й енергії»: у Кембриджі розщеплено ядро під час бомбардування ядер літію протонами з енергією 125 KeV, при цьому виділялося 17,4 MeV енергії).

Фрідман був першим, хто ввів поняття про час існування Всесвіту, він писав у своїй першій статті: «Час, що минув від створення світу, характеризує час, що пройшов від моменту, коли простір був точкою ( $R=0$ ) до нинішнього його стану ( $R=R_0$ )». Проте першим, хто зважився розглянути те, що відбувалося в перші секунди існування Всесвіту, був Г. Гамов, який упродовж 1946–1948 рр. разом зі своїми співробітникам Альфером і Херманом досліджував питання про те, що можуть сказати про перші миті еволюції раннього Всесвіту відомі фізичні закони. Гамов, Альфер і Херман дійшли висновку, що в перші секунди у Всесвіті основна енергія була сконцентрована у вигляді електромагнітного випромінювання дуже високої температури і що з розширенням Всесвіту це випромінювання поступово охоллоло. У 1953 р. Гамов передбачив, що на той час температура цього космічного фонового випромінювання повинна бути



Виступ А. Ейнштейна на прес-конференції (1950)

близько 7 К. Це був дуже важливий прогноз, і в 1965 р. два американські фізики Арно Пензіас і Роберт Вільсон абсолютно випадково відкрили це мікрохвильове випромінювання, що отримало назву «реліктового випромінювання». Його температура дорівнювала  $2,726 \pm 0,005$  К (сучасне значення). У 1978 р. Пензіас і Вільсон отримали за своє відкриття Нобелівську премію з фізики. Сучасний прогрес у розумінні того, як влаштований Всесвіт, значною мірою пов'язаний із недавніми дослідженнями властивостей реліктового випромінювання.

У кінці ХХ ст. А. Ейнштейна назвали «людиною століття», його ідеї геометризації фізики знайшли блискуче втілення в сучасній фізиці елементарних часток. Але наукова доля знаменитого вченого склалася так, що після яскравих тріумфів молодості другу половину життя він провів фактично в повній науковій самотності. Гамов, який близько знав Ейнштейна і багато спілкувався з ним, у своїй «Біографії фізики» писав:

*«Ейнштейн ставав дедалі дратівливішим, коли мова заходила про його роботу і не дуже охоче обговорював її з іншими фізиками. Увагу Ейнштейна чимраз більше займали проблеми сionізму і боротьби за мир, але його наукові здібності залишалися такими*

ж блискучими, як і раніше. Коли автор [Дж. Гамов] під час II Світової війни відвідував Ейнштейна в його затишному будинку в Принстоні, то знаходив його завжди сповненим привабливості. Він (Ейнштейн) згадує багато повчальних і цікавих розмов про різні досягнення сучасної фізики. На столі Ейнштейна лежали розкидані листи паперу, заповнені складними тензорними виразами, що, безперечно, стосуються єдиної теорії поля. Але про це Ейнштейн ніколи не розмовляв. Зараз він напевно в раю і повинен знати, чи правильний шлях він обрав, намагаючись геометризувати всю фізику».

### КОСМОЛОГІЧНА СТАЛА І СУЧАСНІСТЬ

Первинні рівняння загальної теорії відносності, які Ейнштейн остаточно сформулював у листопаді 1915 р., виглядали так:

$$G_{\mu\nu} = \alpha(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}T)$$

Проте у своїй космологічній роботі 1917 року Ейнштейн був змушений видозмінити ці рівняння, увівши в них доданок, що містить космологічну постійну  $\Lambda$ :

$$G_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} = -\alpha(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}T)$$

Введення космологічної постійної Ейнштейн вважав найбільшою помилкою у своєму житті, але насправді виявилось, що найбільшою помилкою Ейнштейна було якраз те, що він вважав уведення цієї величини хибним.

У 1920 р. молодий польський фізик Леопольд Інфельд (1898–1968) уперше зустрівся з Ейнштейном у Берліні (у 1936–1938 рр. Інфельду пощастило працювати разом з Ейнштейном і бути його співавтором). Він запитав у Ейнштейна, що означає тензор енергії-імпульсу  $T_{\mu\nu}$  у наведених вище рівняннях. Ейнштейн сказав: «На це питання важко відповісти. Я кажу в своїх лекціях, що теорія відносності спирається

на дві колони. Одна з них — могутня і прекрасна, ніби виточена з мармуру. Це — тензор кривизни. Друга — хистка, немов соломяна. Це — тензор енергії-імпульсу. Ми повинні залишити цю проблему майбутньому».

Ейнштейн мав рацію. З лівою частиною рівнянь Ейнштейна (геометрією) все зрозуміло, з правою ж (з густиною енергії-імпульсу матерії) багато неясного й дотепер:

$G_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu}$	=	$-\alpha(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}T)$
Геометрія (гравітація)		Матерія (речовина)

Останніми роками ця проблема навіть стала ще більшою. Згідно з даними про анізотропію реліктового випромінювання, отриманими за допомогою космічного апарата WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), запущеного в 2001 р., тільки 4% (за масою) матерії у Всесвіті є звичною нам баріонною речовиною, інші 20% — це темна матерія, 76% — темна енергія. При цьому, якщо темну матерію імовірно пов'язують з існуванням нових, ще невідкритих, таких, що надзвичайно слабо взаємодіють із звичайною матерією часток, то темну енергію вважають квантово-механічною енергією вакууму, яка виявляється у вигляді космологічного члена в рівняннях Ейнштейна. Учений помилявся, відносячи космологічний член до «геометрії». Його потрібно було перенести зліва направо і вважати матерією, як це й зараз роблять:

$G_{\mu\nu} = -\alpha(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}T - \frac{1}{\alpha}\Lambda g_{\mu\nu})$
Геометрія (гравітація)      Темна енергія
Матерія (речовина)

Ще одне найважливіше недавнє відкриття про те, що наш Всесвіт розширюється з прискоренням, було зроблене 10 років тому під час спостережень за найновішими зорями типу Ia, світність яких у мак-



симумі їхнього блиску перебуває в досить вузьких межах. Цю властивість Всесвіту — розширюватися з прискоренням — було відзначено як один із можливих сценаріїв розвитку Всесвіту ще в роботах Фрідмана, вона є наслідком рівнянь Ейнштейна тільки в тому разі, коли космологічна постійна не дорівнює нулю. Подивімося на формулу, отриману в роботах Фрідмана:

$$\frac{dR(t)}{dt} = c \sqrt{\frac{A - kR + \frac{\Lambda}{3c^2} R^3}{R}}$$

У формулі Фрідмана  $R(t)$  — «радіус» Всесвіту, що змінюється з часом, кривизна якого може бути як позитивною ( $k = 1$ ), так і негативною ( $k = -1$ ),  $A$  — деяка стала величина. Фрідман не розглянув кривизни, що дорівнює нулю ( $k = 0$ ), проте формула Фрідмана справедлива і в цьому разі. Кривизну позитивну, негативну або ж таку, що дорівнює нулю, визначає те, чи густина речовини у Всесвіті дорівнює деякій критичній густині (або ж більша чи менша за неї), яка залежить від віку Всесвіту і на цю мить становить  $(1,0 \pm 0,1) \times 10^{-29}$  г/см<sup>3</sup>. Детальний аналіз анізотропії реліктового випромінювання, ретельно виміряної апаратом WMAP, дає змогу зробити висновок, що густина речовини у Всесвіті точно дорівнює критичній густині, тобто кривизна Всесвіту дорівнює нулю ( $k=0$ ). Це означає, що наш Всесвіт — плоский (у разі плоского Всесвіту, що розширюється,  $R(t)$  є деяким «масштабним

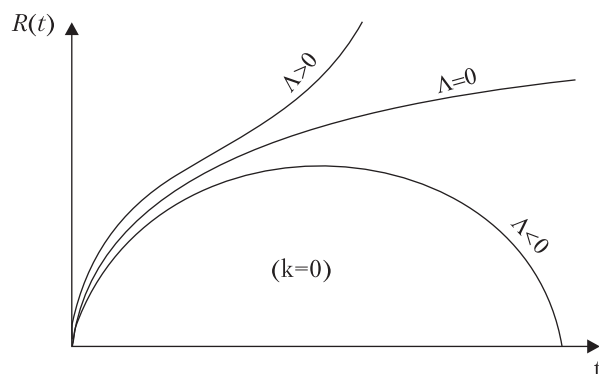


Рис. 2. Еволюція Всесвіту нульової кривизни згідно з рівнянням Ейнштейна

чинником», що характеризує зміну відстаней у Всесвіті: координати галактик фіксовані, але відстані між ними змінюються залежно від того, як змінюється  $R(t)$ ). Для  $k=0$  формула Фрідмана моделює такі сценарії розвитку Всесвіту (Рис. 2).

Отже, тільки при позитивній космологічній сталій теорія Ейнштейна описує спостережуване практично розширення Всесвіту з прискоренням (верхня крива на рис. 2), що фактично й передбачив видатний учений.

У 1932 р., звертаючись до студентів Каліфорнійського університету в Лос-Анджелесі, А. Ейнштейн сказав, що «зусилля учених ґрунтуються на впевненості в тому, що дійсність повинна мати дуже гармонійну структуру. Сьогодні в нас більше підстав для такої прекрасної впевненості, ніж будь-коли раніше».