

1. *Einstein A.* Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt // Ann. Phys. — 1905. — Bd.17, vierte Folge, sechstes Heft. — S.132—148.
2. *Hertz H.* Über einen Einfluss des ultravioletten Lichtes auf die elektrische Entladung // Ann. Phys. u. Chem. — 1887. — Bd.31. — S.983—1000.
3. *Hallwachs W.* Über den Einfluss des Lichtes auf electrostatisch geladene Körper // Ann. Phys. u. Chem. — 1888. — Bd.33. — S.301—312.
4. *Wiedemann E. u. Ebert H.* Über den Einfluss des Lichtes auf die elektrischen Entladungen // Wied. Ann. — 1888. — Bd.33. — S.241—264.
5. *Столетов А.Г.* Избранные сочинения. — М.; Л.: Гос. изд-во техн.-теорет. литературы, 1950.
6. *Stoletow A.* Sur les phénomènes actino-électriques // C.R. — 1889. — Vol.108. — P.1241—1243.
7. *Elster J., Geitel H.* Lichtelektrische Versuche // Wied. Ann. — 1892. — Bd.46. — S.281—291.
8. *Lenard P., Wolf M.* Zerstäuben der Körper durch ultraviolettes Licht // Wied. Ann. — 1889. — Bd.37. — S.443—456.
9. *Lenard P.* Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultraviolettes Licht // Ann. Phys. — 1900. — Bd.2. — S.359—375.
10. *Lenard P.* Über die lichtelektrische Wirkung // Ann. Phys. — 1902. — Bd.8. — S.149—198.

**Одержано 27.07.2004**

**А.И.Проскура**

### **К 100-летию юбилею гипотезы А.Эйнштейна о световых квантах**

*Показаны эйнштейновская гипотеза световых квантов и интерпретация ним внешнего фотоэлектрического эффекта. Коротко рассмотрены история экспериментальных исследований и предпосылки, которые были необходимы для обоснования гипотезы световых квантов.*

*О.Ю. Колтачихіна*

## **Альберт Ейнштейн — засновник релятивістської космології і сучасний погляд на Всесвіт**

*Висвітлено історію створення А.Ейнштейном релятивістської теорії гравітації, започаткування космології як науки завдяки його працям. Характеризуються сучасні моделі й сценарії розвитку Всесвіту, уявлення про його структуру, що базуються на теоріях Ейнштейна й розвивають їх.*

Альберта Ейнштейна по праву можна назвати одним із творців сучасної фізики, роботи якого докорінно змінили уявлення про простір, час та матерію. Він зробив значний внесок у такі галузі, як статистична та квантова фізика, теорія гравітації, створив спеціальну та загальну теорію відносності, започаткував розвиток космології як науки.

2005 р. знаменує столітній ювілей праці “До електродинаміки тіл, що рухаються” [1], в якій було запропоновано спеціальну теорію відносності. Дана теорія, переглянувши основні положення фізики Ньютона, узагальнила класичні закони руху на випадок швидкостей порядку світлових. Це привело до встановлення нового погляду на природу і запо-

© О.Ю.Колтачихіна, 2005

чаткувало тим самим нову еру в науці. У цьому ж 1905 р. А.Ейнштейн відкрив закон взаємозв'язку маси та енергії, запровадив уявлення про дискретну, квантову структуру світла. Враховуючи фундаментальне наукове та світоглядне значення відкриттів А.Ейнштейна 1905 р., а також для акцентування уваги на ключовій ролі фізичної науки для прогресу людства, Генеральна асамблея ООН прийняла рішення вважати 2005 рік Міжнародним роком фізики.

Основу нової теорії — релятивістської космології — було закладено в праці А.Ейнштейна 1907 р. “Про принцип відносності і його наслідки” [2]. У ній вперше було сформульовано принцип еквівалентності (відношення інертної маси тіла до гравітаційної однакове для всіх тіл) і на його основі обговорювався вплив гравітаційного поля на поширення світла. У 1911 р. А.Ейнштейн знову повернувся до теорії тяжіння, що ґрунтувалася на принципі еквівалентності. У цей час до розробки гравітаційних теорій активно долучились інші фізики. Німецький фізик М.Абрагам висунув скалярну теорію гравітаційного поля, яка не узгоджувалася з принципом відносності. Г.Нордстрем і Г.Мі розробили лоренц-коваріантні теорії поля тяжіння, які були задовільні логічно, але не давали змоги пояснити аномального руху перигелію Меркурія й знайти відхилення світла в гравітаційному полі. М.Планк одним з перших поставив питання про рівність інертної й гравітаційної мас. Йому разом з Мінковським належить варіаційне чотирьохвимірне формулювання принципу інерції.

Навесні 1913 р. А.Ейнштейн разом з М.Гроссманом закінчив працю [3], в якій теорія відносності приймає узагальнений вигляд, але не має ще вірних рівнянь гравітаційного

поля. Авторі не оцінили можливостей тензорів Рімана — Крістоффеля і Річі для встановлення польових рівнянь, відмовились від суттєвої вимоги про загальну коваріантність цих рівнянь. Тільки в 1915 р. А.Ейнштейн знову повертається до цієї вимоги.

У листопаді 1915 р. на засіданні Академії наук у Берліні А.Ейнштейн повідомляє свій новий остаточний варіант теорії, де загальна теорія відносності набула рис глибоко фізичної й водночас строго математичної теорії. Встановленням загальноковаріантних рівнянь тяжіння

$$\partial \Gamma_{\mu\nu}^{\alpha} / \partial x_{\alpha} + \Gamma_{\mu\beta}^{\alpha} \Gamma_{\nu\alpha}^{\beta} = -\chi (T_{\mu\eta} - g_{\mu\eta} T/2)$$

завершився пошук, що протягом більше восьми років вів Ейнштейн. У тому ж листопаді 1915 р. в Геттінгені Д.Гільберт доповів про рівняння, які він отримав іншим шляхом [4]. У цій роботі він намагався побудувати єдину польову фізичну теорію за допомогою сильного математичного апарату, який містить ріманову геометрію, тензорний аналіз, теорію груп Лі і варіаційне числення. Ці дві доповіді показали два різних стиля наукового дослідження. А.Ейнштейн вірив в гармонію світу, шукав і знаходив глобальні фізичні закономірності в природі, тоді як Д.Гільберт йшов шляхом створення аксіоматичної науки.

Узагальнюючи, можна дати наступну періодизацію історії створення релятивістської теорії гравітації А.Ейнштейном:

- відкриття принципу еквівалентності (1907);
- скалярні теорії (1911 — 1912);
- розробка тензорної геометричної концепції тяжіння (1912 — 1913);
- пошуки рівнянь гравітаційного поля (1913 — 1915).

У 1917 р. Альберт Ейнштейн, виходячи із загальної теорії відносності та використовуючи нову фізику простору і часу в застосуванні до Всесвіту як єдиного цілого, запропонував першу релятивістську модель Всесвіту, заклавши тим самим початок релятивістської космології [5]. У своїй статті А.Ейнштейн дійшов висновку, що “ньютонівський Всесвіт взагалі не міг би існувати” [5, с.602], і модифікував теорію Ньютона, створюючи тим самим свою модель Всесвіту.

Підходячи до побудови космології, що ґрунтується на теорії відносності, А.Ейнштейн також поділяє деякі загальні точки зору на Всесвіт, що існували в науці в той час. Насамперед він дотримувався того, що структура Всесвіту повинна бути максимально простою. Зокрема, він вважав, що Всесвіт як єдине ціле повинен бути однорідним (розподіл речовини в ньому усюди однаковий по густині). “... Якщо говорити про структуру простору в цілому, то ми можемо уявити матерію нібито рівномірно розподіленою по дуже великій області простору... У даному випадку ми робимо так, як геодезисти, які дуже складну в деталях поверхню Землі замінюють приблизно еліпсоїдом” [5, с.608]. Простір, в якому вся речовина розподілена однорідно, і сам має бути однорідним, тобто всюди однаковим за своїми геометричними властивостями. А.Ейнштейн вважав також, що разом з однорідністю світу існує й ізотропія, тобто рівноправність усіх напрямків в просторі.

Необхідно відмітити, що А.Ейнштейн у своїй роботі запропонував гіпотезу про те, що поряд із звичайною речовиною, усі частинки якої взаємно притягуються, у світі існує інше середовище, яке створює не притягування, а антипритягування (математично ця гіпотеза вира-

жається у введенні “ $\lambda$ -члена”). Це середовище впливає на звичайну речовину і здатне скомпенсувати взаємне притягування його частинок.

Світ Ейнштейна являє собою трьохвимірний сферичний простір із постійною позитивною кривизною і кінцевим об’ємом: “... Світовий континуум повинен по відношенню до своїх просторових розмірів розглядатися як замкнутий континуум, що має кінцевий просторовий (трьохвимірний) об’єм” [5, с.605]. Його Всесвіт стаціонарний, незмінний і нескінченний в часі. Він може містити матерію, що розподілена однорідно і з кінцевою густиною. Недоліком ейнштейнівського Всесвіту залишилась відсутність червоного зміщення світла від віддалених об’єктів, яке присутнє в реальному Всесвіті.

Принципово нова постановка і розв’язання космологічної проблеми в рамках загальної теорії відносності А.Ейнштейном зробили революційний переворот в уявленнях про Всесвіт. Дана теорія повністю використовує фундаментальну ідею відносності всіх видів руху. Це приводить до розгляду фізичних законів в довільних системах просторово-часових координат і до форми цих законів, що не залежить від конкретного вибору просторово-часових координат, а також включає в розгляд ефект гравітаційної взаємодії.

Теорія відносності також викликала гостру полеміку в науковому світі, початок якої заклав В. де Ситтер, який в тому ж 1917 р. запропонував свою космологічну модель [6]. Його модель, як і модель Ейнштейна, задовольняла загальну теорію відносності, мала кінцевий простір позитивної кривизни при середній густині в ній, рівній нулю. Властивості простору в ній не змінюються з часом, але галактики розбігаються під дією додаткових космологічних сил. Всесвіт де Ситтера був

однорідний та ізотропний і з довільної точки “виглядає” однаково. Простір-час визначається як чотирьохвимірною поверхня в п’ятивимірному просторі, й геометрія Всесвіту де Ситтера розглядається на сфері, що занурена в п’ятивимірний евклідовий простір. Метагалактика де Ситтера повинна бути абсолютно порожньою, тобто не містити речовини або випромінювання.

У 1918 р. А.Ейнштейн критикує модель де Ситтера: “Якщо б розв’язок де Ситтера був справедливим усюди, то тим самим було б показано, що введення “ $\lambda$ -члена” не досягає наміченої мною цілі. Справа в тому, що, на мою думку, загальна теорія відносності тільки в тому випадку являє собою задовільну схему, якщо на її основі фізичні властивості простору повністю визначаються тільки матерією. Таким чином, ніяке поле, тобто ніякий просторово-часовий континуум, не може існувати без матерії, що його породжує” [7, с.648].

Теорія відносності Ейнштейна стала дієвим інструментом всієї сучасної фізики, її розвиток продовжується й сьогодні. Першим, кому вдалося на підставі рівнянь Ейнштейна одержати принципово нові висновки про структуру Всесвіту, був О.О.Фрідман. Його дослідження показали, що рівняння загальної теорії відносності Ейнштейна не дають однозначної моделі Всесвіту незалежно від значення космологічної сталої й відкрили можливість існування нестационарного Всесвіту.

У статті 1922 р. “Про кривизну простору” [8] він знайшов новий космологічний розв’язок рівнянь загальної теорії відносності й показав, що наш Всесвіт нестационарний, замкнений і невпинно розширюється.

У 1924 р. О.О.Фрідман опублікував другу статтю — “Про можливість

світу з позитивною від’ємною кривизною простору” [9], де привів два рішення рівнянь Ейнштейна, кожне з яких залежить від середньої густини матерії у Всесвіті. Якщо середня густина менше або дорівнює деякій величині, то остання може бути як нескінченною, так і скінченною, але розширення її буде тривати постійно. Якщо ж середня густина більше цієї величини, то обов’язково одержимо замкнений Всесвіт, причому сили гравітації в цьому випадку повинні зрештою зупинити розширення Всесвіту й він почне стискуватися. Спектр розв’язків, отриманих Фрідманом, включав як стаціонарний випадок, так і нестационарний, що відповідає зміні в часі радіуса кривизни простору. Для світу з негативною стаціонарною кривизною простору він знайшов нові рішення, які відповідали «нульовій або негативній густині речовини».

Найпростіша модель Фрідмана збігається з моделлю Ейнштейна — де Ситтера [10] й відповідає випадку, коли густина речовини у Всесвіті дорівнює деякому її критичному значенню; при цьому простір є евклідовим, тобто має нульову кривизну, а його об’єм — нескінченний. Друга, так звана замкнена модель, відноситься до випадку, коли  $\rho > \rho_{кр}$ . Ця умова відповідає сферичному риманову простору з позитивною сталою (для кожного моменту часу) кривизною й кінцевим об’ємом; розширення світу починається в деякій нульовий момент часу, а потім змінюється стисненням. Якщо ж густина речовини менше критичної, то геометрія третьої, так званої відкритої моделі, відповідає простору Лобачевського з постійною негативною кривизною й нескінченним об’ємом.

У 1927 р. бельгійський астроном Ж. Леметр побудував та вивчив космологічну модель нестатичного типу (мо-

дель Леметра [11]), згідно з якою космологічна стала дещо більша того значення, при якому Всесвіт знаходиться в стаціонарному стані. У цій моделі масштабний фактор зростає від нуля необмежено, але протягом деякого часу його значення змінюється несуттєво, тобто відбувається “застигання”.

Ж.Леметр припустив, що кілька мільярдів років тому вся речовина Всесвіту була сконцентрована в один згусток — «первісний атом», що потім “вибухнув”. І хоча в цьому згустку була зосереджена вся маса Всесвіту, його розміри не перевищували відстані від Землі до Сонця. Речовина, що розлетілася в усі сторони в результаті вибуху, сконденсувалася потім у галактики, в яких почався процес утворення зірок.

У 1946 р. американський фізик українського походження Дж.Гамов заклав початок фундаментальної концепції сучасної космології — “моделі гарячого Всесвіту” [12]. Відповідно до цієї теорії спочатку вся матерія Всесвіту була зосереджена в області дуже малих розмірів (порядку  $10^{-33}$  см) і розігріта до дуже високої температури. Потім вона почала розширюватись й охолоджуватись з надзвичайно великою швидкістю. У хмарі перегрітих субатомних частинок, що розширювалась, поступово стали формуватися атоми, з них утворювались галактики, зорі, планети. Ця теорія добре пояснює вміст водню, гелію та інших легких елементів у Всесвіті. Але, не дивлячись на це, стандартна теорія викликає ряд питань: це проблема сингулярності (що було до моменту часу  $t = 0$ ), проблема горизонту, проблема утворення галактик, проблема баріонної асиметрії, питання, чому вся матерія була сконцентрована в точку і що спричинило її вибух та інші.

Сьогодні однією із спроб відповідати на ці питання є інфляційний сце-

нарії, перша версія якого була запропонована в 1979 р. О.Старобінським [13] з Інституту теоретичної фізики ім.Л.Д.Ландау (Москва). Ідея його підходу полягає в тому, що Всесвіт на ранніх стадіях своєї еволюції міг знаходитися в нестійкому вакуумно-подібному стані, що має велику густину енергії. При цьому, згідно з рівняннями Ейнштейна, Всесвіт повинен розширюватися експоненційно. Потім за рахунок нестійкості відбувається розпад вакуумно-подібного стану, вся його енергія переходить в теплову, і Всесвіт розігрівається до надзвичайно високої температури. З цього моменту еволюція Всесвіту описується стандартною теорією. Стадія експоненціального розширення Всесвіту відіграє важливу роль для формування великомасштабної структури Всесвіту.

Вперше на можливість існування стадії експоненціального розширення Всесвіту в вакуумно-подібному стані вказав фізик українського походження Глінер Е.Б. [14]. У 1981 р. А. Гат [15] із Массачусетського технологічного інституту запропонував здійснити цю ідею за рахунок переходу гарячого Всесвіту в вакуумно-подібний переохолоджений стан під час фазових переходів в речовині з великою густиною. Його модель була виведена з теорії, що інтерпретувала ранній Всесвіт як серію фазових переходів і була запропонована в 1972 р. в московському Фізичному інституті ім.П.М.Лебедева Д. Кіржницем та А. Лінде [16]. Згідно з нею, Всесвіт у міру розширення й охолодження конденсувався в різні форми. На жаль, як зазначав сам Гат, післяінфляційний Всесвіт у такому сценарії стає надзвичайно неоднорідним. Тому після досліджень цієї моделі впродовж року він відмовився від неї. Значна заслуга Гата в тому, що він запропонував використовувати

властивості космологічних фазових переходів з великим переохолодженням для розв'язку проблем горизонту та площинності.

У 1982 р. А. Лінде запропонував так званий новий сценарій інфляційного Всесвіту [17], який усував основні проблеми моделі Гага, але був ще доволі складним і не зовсім реалістичним, але даний сценарій дозволяв розв'язати проблеми великомасштабної однорідності та ізотропії Всесвіту. Роком пізніше Лінде запровадив новий сценарій, який назвав хаотичною інфляцією [18]. Згідно з ним у Всесвіті існують місця, які залишаються малими. При цьому домени, в яких інфляція наявна, стають експоненціально великими і домінують у загальному об'ємі. У той час, коли існуючі вже неоднорідності “розгладжуються”, інфляція створює нові.

“...Сценарій хаотичного розширення дуже відрізняється від усіх інших варіантів сценарію Всесвіту, що розширюється, оскільки даний сценарій не ґрунтується на вивченні високо-температурних фазових переходів в теоріях зі спонтанно порушеною симетрією. ...Розширення Всесвіту — це не екзотичне явище, ... а природний наслідок хаотичних початкових умов у ранньому Всесвіті, який здійснюється в широкому класі теорій елементарних частинок”, — писав А. Лінде [18, с.150].

Викладене показує, що загальна теорія відносності, створена А.Ейнштейном, мала бурхливий подальший розвиток і привела до формування космології як науки. Внесок А.Ейнштейна в розвиток інших галузей сучасної фізики також настільки значний, що його ім'я назавжди залишиться в історії людства.

1. Einstein A. // Annalen der Physik. — 1905. — Bd.17. — S.891—921.
2. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. — М.:Наука, 1966. — Т.1. — С.67—114.
3. Там само. — С.227—266.
4. Альберт Эйнштейн и теория гравитации: Сборник статей. — М.:Мир, 1979. — С.133—146.
5. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. — М.:Наука, 1966. — Т.1. — С.601—612.
6. de Sitter W. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 1917. — Vol.78. — P.3—28.
7. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. — М.:Наука, 1966. — Т.1. — С.647—649.
8. Friedman A. // Zeitschrift für Physik.—1922. — Bd.10. — S.377—386.
9. Friedman A. // Zeitschrift für Physik.—1924. — Bd.21. — S.326—332.
10. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. — М.:Наука, 1966. — Т.2. — С.396—398.
11. Lemaitre G. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. — 1931. — Vol.91. — P.483—490.
12. Gamov G. // The Physical Review. — 1946. — Vol.68. — P. 572—573.
13. Старобинский А. А. // Письма ЖЭТФ. — 1979. — Т.30, вып.11. — С.719—723.
14. Глинер Э. Б. // ЖЭТФ. — 1965. — Т.49, вып.2(8). — С.542—548.
15. Guth A. H. // Physical Review D. —1981. — Vol. 23, № 2. — P.347—356.
16. Kirzhnits D. A., Linde A. D. // Physics Letters. — Vol. 42B, № 4. — P.471—474.
17. Linde A. D. // Physical Letters. — Vol. 108B, № 6. — P.389—393.
18. Линде А.Д. // Письма ЖЭТФ. — 1983. — Т.38, вып.3. — С.149—151.

Одержано 07.09.2005

О.Ю.Колтачихина

### Альберт Эйнштейн — основатель релятивистской космологии и современный взгляд на Вселенную

*Освещены история создания А.Эйнштейном релятивистской теории гравитации, основание космологии как науки благодаря его работам. Характеризуются современные модели и сценарии развития Вселенной, представления об ее структуре, базирующиеся на теориях Эйнштейна и развивающие их.*