

Б.Ю. ЖИЛЯЄВ

ЩО БУЛО НА ПОЧАТКУ

Мало хто знає, що таке Всесвіт, але багато хто чув, що він нескінченний і виник у момент Великого Вибуху близько 14 мільярдів років тому. Що знає пересічний громадянин про Всесвіт? У побутовому сенсі він уявляє собі Всесвіт як величезний простір, заповнений зірками і галактиками. І якщо летіти в ньому зі швидкістю світла 14 мільярдів років, то долетиш до тієї межі, звідки до нас ще не приходило світло, отже, про ту частину світобудови ми нічого не знаємо. Так само, як до Колумба ніхто не підозрював, що є Південна Америка та інші континенти. Однак це правильно лише в побутовому сенсі. І як говорив Річард Фейнман, немає у фізиці більш ненадійного радника, ніж здоровий глузд.

Всякая теория Вселенной неизбежно
приходит к одной личности,
именно к Тебе
УОЛТ УИТМЕН

«На берегу голубого Онтарио»

ПРО ПОХОДЖЕННЯ ВСЕСВІТУ

Будь-які міркування про Всесвіт мають скороминущий характер. Немає чіткого — у філософському, фізичному і математичному сенсі — визначення Всесвіту. Отже, ми намагаємося розмірковувати про те, що точно не визначено. Як тотальний об'єкт, Всесвіт перебуває поза сферою фізичного дослідження. З ним не можна експериментувати так, як це можна робити з бактерією чи елементарною частинкою.

З фізичного погляду теоретичний аналіз найбільш ранніх стадій розвитку Всесвіту в рамках рівнянь загальної теорії відносності (ЗТВ) стикається з непереборними труднощами. Як зазначають автори одного університетського підручника з сучасної геометрії для студентів-математиків МДУ, «аналіз рівнянь Ейнштейна — трансцендентно складна задача» [1]. Проблему походження Всесвіту намагався вирішувати Піфагор, займаючись «витлумаченням світу». Відоме також учення про «досвітове буття Логосу» в дусі апостола Іоанна — про те, що було до створення світу. Як зауважив індійський філософ

С. Чаттерджі, аналіз проблем, що виходять за межі фізичного досвіду, належить, на жаль, вже не до компетенції фізики, а метафізики. При цьому важливо розуміти, де закінчується фізика і починається метафізика.

Є ще фізики, які пам'ятають ОАС (Об'єднаний астрофізичний семінар), що процвітав у Москві в 60-ті роки. На нього з'їжджалися з усього Союзу. Медіаторами були академіки Яків Зельдович, Віталій Гінзбург (нобелівський лауреат), професор Йосип Шкловський. У дискусіях та виступах був відчутний невловимий флюїд — тон задавали теоретичні медитації Зельдовича, яким вторував словесний пуантилізм учасників семінару. Це був інтуїтивний, абсолютно нестрогий, нелогічний потік свідомості, як нині кажуть — брейнстормінг, що часом здавався нісенітницею, такий собі словесний калейдоскоп, в якому раптом виникали перлини. З них потім, не відразу, склалася, сформувалася сучасна космологія — наука про походження Всесвіту. Цей московський ОАСівський стиль проіснував з десятків років. Він і нині ще живий в малих осередках по всьому світу,

в середовищі спеців із квантової теорії поля, що займаються теорією струн і квантовою гравітацією. Там, у цих осередках народжується все нове, що утверджується в сучасній космології. У цих колах є свої архати. Серед них професор Андрій Лінде [2], колишній московський фізик, співробітник Стенфордського університету (США), один із авторів теорії інфляційної космології, що радикально змінила наші уявлення про Всесвіт за останні два десятиліття.

ДО ІСТОРІЇ ВСЕСВІТУ. КВАНТОВА ГРАВІТАЦІЯ

Вік Всесвіту оцінюють приблизно в 14 мільярдів років. Природно виникає запитання: а що було раніше? Для цього потрібно здійснити подорож у минуле. Проте, як пише академік В. Рубаков, видатний російський фахівець із космології, наївне продовження еволюції назад у часі до «початку», до моменту Великого Вибуху приводить до нескінченності: нескінченної густини речовини, нескінченної температури. Як сьогодні стає зрозуміло, «початку» не було, було безпочаткове минуле.

Загальна теорія відносності створювалася в припущенні, що континуальний, тобто неперервний, опис простору-часу зберігається на як завгодно малих масштабах. Планк і Гейзенберг із самого початку здогадувалися, що континуальний опис реального світу, ймовірно, зазнає невдачі через квантові ефекти у гравітації. Оперуючи трьома фундаментальними константами — гравітаційною сталою G Ньютона, швидкістю світла c і сталою Планка h , — можна скласти унікальні комбінації розмірності планківських довжини $L_p = \sqrt{(Gh/c^3)}$, її чисельне значення $\sim 10^{-33}$ см, і часу $L_t = \sqrt{(Gh/c^5)}$, $\sim 10^{-43}$ с, а також характерної планківської енергії $E_p = \sqrt{(hc^5/G)}$ $\sim 10^{19}$ GeV і планківської густини $\rho_p = c^5/(G^2h) = 5,4 \cdot 10^{93}$ г/см³. Такі значення величин перебувають далеко за межами, в яких оперує сучасна експериментальна фізика. Тому неможливість дослідної перевірки робить усі космологічні сценарії продуктом чистого розуму.

Фізика процесів на масштабах, більших і менших від планківської довжини простору й часу L_p і L_t , має відрізнятися хоча б через те, що учасниками гри по різні боки бар'єра є різні сили. Передбачається, що на відстанях, менших від планківської довжини L_p , стають важливими квантові ефекти в геометрії простору і часу. Якщо їх ігнорувати і продовжувати користуватися класичним континуальним описом, в обчисленнях з'являються нескінченності, тобто нісенітниця. Планківський час $L_t \sim 10^{-43}$ с, як зазначає Лінде, — це момент, починаючи з якого ми вперше можемо розглядати Всесвіт у термінах нормального простору-часу. Це «після», а «до» — самі поняття простору і часу стають невизначеними.

КВАНТОВО-МЕХАНІЧНИЙ ОПИС ВСЕСВІТУ НА РАННІЙ СТАДІЇ РОЗВИТКУ

Квантова механіка як наука склалася для пояснення будови й поведінки матерії на рівні атомів, молекул і елементарних частинок. Цю сферу прийнято називати мікросвітом, на відміну від макросвіту — Всесвіту. Якщо говорити про величини, то атом водню має розмір, що становить п'ять сотих нанометра, а електрон ще в шістнадцять тисяч разів менший. Саме мікросвіт — арена, де панують квантові закони.

Квантова механіка описує поведінку частинок у просторі та часі на основі ймовірнісних законів. Ймовірнісні властивості частинок визначаються так званою хвильовою функцією. Частинка у квантовій механіці перестає бути точно прогнозованим об'єктом. Принципово важливим моментом стає і те, що деякі характеристики частинок перестають бути неперервними. Так, енергія, кількість руху (імпульс), кількість обертання (спін) можуть ставати дискретними, тобто квантами. Не можна виключити й того, що можуть набувати дискретної структури й самі простір і час.

Фундаментальною особливістю квантової фізики є співвідношення невизначеності. Зі співвідношення невизначеності Гейзенберга $\Delta E \cdot \Delta t \geq h$, де h — стала Планка,

можна стверджувати, що на достатньо малих інтервалах часу Δt невизначеність енергії частинок ΔE може ставати настільки великою, що стан системи вже не можна розглядати як стаціонарний, тобто незмінний у часі. Для стаціонарності необхідно, щоб невизначеність енергії ΔE була меншою, ніж відстані між сусідніми дискретними рівнями енергії в енергетичному спектрі речовини. Квантова механіка задає цілком визначений набір значень енергії для кожного конкретного стану речовини. Навіть у випадку макроскопічного тіла на початковій стадії розвитку Всесвіту можна знайти таке значення Δt , коли ця умова перестане виконуватися. У такому разі опис стану системи за допомогою квантово-механічної хвильової функції стає нездійсненним, оскільки немає даних для її побудови. З цього можна зробити лише один висновок — на найранішій стадії свого розвитку Всесвіт не міг бути *стаціонарним*, тобто він міг існувати тільки змінюючись. А це вже дещо. І цей висновок має глобальний характер і стосується Всесвіту загалом. Таким чином, абсолютно несподівано виявилось, що на найраніших стадіях розвитку Всесвіту рухом матерії в ньому керували не звичні для нас закони механіки Ньютона й Ейнштейна, а неясні та важкі для розуміння пересічного громадянина закони квантової механіки. Коли Всесвіт мав планківський вік $\sim 10^{-43}$ с, мікросвіт і макросвіт були єдині й неподільні. Це означає, що не можна було сказати, ЩО і ДЕ знаходиться та З ЧОГО складається. Такий стан світу називають Планківською ерою, а матеріальний субстрат — «просторово-часовою піною». А ось квантово-механічну теорію цієї «піни» не створено досі.

ПРИЧИННИЙ ГОРИЗОНТ. ГУМАНІТАРНИЙ ВИКЛАД ФІЗИЧНОЇ КОСМОЛОГІЇ

Відомо, що галактики розбігаються. Ще Е. Хаббл у 20-х роках минулого століття встановив, що чим далі галактика, тим з більшою швидкістю вона віддаляється від нас. Уже відомі галактики, які віддаляються від

нас з релятивістськими швидкостями, тобто зі швидкостями, порівнянними зі швидкістю світла. Цей феномен пояснюють як розширення Всесвіту, тобто, з геометричного погляду, як збільшення радіуса кривизни нашого світу. Просту аналогію, яка допомагає зрозуміти суть явища, можна провести на прикладі повітряної кульки, яку надувають. Надуваючи кульку, ми збільшуємо її радіус, тобто змінюємо кривизну її поверхні. А якщо уважно проаналізувати, то комашки, що сидять на поверхні такої кульки, виявили б, що вони віддаляються одна від одної. До того ж, чим далі, тим з більшою швидкістю. При цьому самого факту надування кульки комашки могли б і не помітити.

Кривизна простору обмежує наше бачення світу, ми бачимо світ лише до горизонту подій. Нас не дивує, що, перебуваючи в Києві, ми не бачимо Москви. Ми живемо на викривленій поверхні Землі і бачимо предмети тільки до горизонту. Подорожуючи в минуле Всесвіту, ми б звернули увагу, що розміри горизонту скорочуються, тому що кривизна простору обернено пропорційна вікові Всесвіту. Настав би момент, коли горизонт скоротився б до розміру Галактики, Сонця, Землі, електрона... Звідси ясно, що в історії Всесвіту були моменти, коли, виходячи з причинних міркувань, у ньому не могли існувати навіть елементарні частинки. Якщо горизонт скорочується до розміру елементарної частинки, то гравітаційна сила і «польові сили», що визначають електромагнітну/слабку/сильну взаємодію і, відповідно, будову елементарної частинки, зрівнюються за величиною, і з частинкою щось мало б статися. Що? — Фазовий перехід. Найслабша серед взаємодій — гравітаційна — у міру заглиблення в історію Всесвіту набирала б «сили», об'єднувалася з іншими взаємодіями, доки не настала б епоха «Великого об'єднання».

Фазові переходи зазвичай супроводжуються порушеннями симетрії та появою нових просторово організованих структур. Усім відомо, що зі зміною температури вода зазнає фазових перетворень, переходячи з газоподібного стану в рідину або лід. І ми чітко

усвідомлюємо, як значно різняться ці фази за внутрішньою будовою і зовнішнім виглядом. Подібні структури — топологічні дефекти — як наслідок порушення симетрії під час фазових переходів у матерії Всесвіту утворювалися на найраніших стадіях його розвитку. Такі структури називають струнами, текстурами, монополями, бранами. Вони, ніби поручик Кіже, існують, але вигляду не мають. Їх шукають, але поки що не знаходять. Вони залишаються справжньою інтригою фізики й астрономії вже не один десяток років.

ІЄРАРХІЯ ЧАСТИНОК І СВІТІВ

Найважливішим моментом квантової космології виявилася необхідність використання теорій простору з кількістю вимірів понад три.

Тривимірний характер нашого світу не порушується на масштабах аж до ~ 1 мм, що підтверджує експериментальна перевірка закону тяжіння Ньютона. Це означає, що всі три закони Ньютона прекрасно описують рух матеріальних частинок під дією гравітаційних сил. Якби простір не був тривимірним, ми б одразу, як наслідок, помітили відхилення в рухах планет. Додаткові просторові виміри з'являються в теоріях, що пояснюють будову і номенклатуру елементарних частинок. Вони виявляються лише на мікроскопічних масштабах, порівнянних з планківською довжиною. Ці додаткові виміри компактні. Вони нагадують туго згорнуті паперові кульки, що мають складну структуру і мізерно малий розмір. На великих масштабах наш простір тривимірний.

Теорія струн (топологічних дефектів, згаданих вище) описує весь спектр елементарних частинок (її ще називають М-теорією). Вона містить 7 додаткових компактних вимірів. Крім того, вона описує й цілу низку об'єктів з протяжними вимірами — бран (мембран). Тривимірні протяжні об'єкти назвали 3-брани, чотиривимірні — 4-брани і так далі. Наш Всесвіт — 3-брана, занурена у простір вищої розмірності — Мультивсесвіт. Світи, подібні до нашого Всесвіту, пов'язані в ньому лише тим, що обмінюють-

ся з ним гравітонами (квантами гравітаційного поля) і гіпотетичними, ще не відкритими частинками, що слабо взаємодіють з матерією [3].

Дивовижним чином особливості будови елементарних частинок матерії на найменших масштабах виявилися пов'язаними з будовою Всесвіту на грандіозних просторових масштабах. Подібно до того, як геометрія Рімана визначила структуру рівнянь загальної теорії відносності, було встановлено, що фізичні властивості елементарних частинок тісно пов'язані з будовою комплексних геометричних просторів Калабі — Яу. Виявилось, що вигляд простору Калабі — Яу впливає на маси частинок, властивості взаємодій і сил у матеріальному світі. Отже, властивості елементарних частинок і початкові космологічні умови у Всесвіті виявилися тісно пов'язаними через геометрію різноманіття Калабі — Яу.

БАГАТОВИМІРНІ ПРОСТОРИ КАЛУЦИ – КЛЕЙНА І КАЛАБІ – ЯУ. ДЕЯКІ ПИТАННЯ БАГАТОВИМІРНОЇ ФІЗИКИ

Існування додаткових просторових вимірів постулювали математики Калуца і Клейн у 1919 р. У нас, 3D-спостерігачів, немає органів чуття, які дали б нам можливість сприймати ці додаткові виміри. Однак на прикладі сценарію Калуца – Клейна можна простежити всі головні особливості сучасних багатовимірних моделей М-теорії.

У найпростішому випадку додамо до нашого тривимірного світу один додатковий просторовий вимір z . Повний набір координат у $(4+1)$ -вимірному просторі-часі — це $(x_\mu; z)$, $\mu = 0, 1, 2, 3$. За низьких енергій фізика буде $(3+1)$ -вимірною, якщо координата z буде компактною (згорнутою) з деяким радіусом R , що визначає характерний розмір додаткового просторового виміру. Це означає, що z змінюється в обмежених розмірах, від 0 до $2\pi R$. Інакше кажучи, 4-вимірний простір є циліндричним, причому три його виміри $x_1; x_2; x_3$ нескінченні, а четвертий вимір z — це круг радіуса R . Зауважимо, що на

масштабах, більших від R , спостерігач «не бачить» додаткового 4-го виміру. Йому здається, що він живе в тривимірному світі.

Зазначимо важливий факт: компактні (згорнуті) виміри простору мають колосальну внутрішню енергію. Навіть такі потужні прискорювачі, як адронний колайдер, не можуть подолати тих сил, що діють в околі згорнутих вимірів. Структура матерії на рівні масштабів, порівнянних з планківською довжиною, прихована від нас грандіозним енергетичним бар'єром. Нагадаємо, що планківська енергія $E_p = \sqrt{(hc^5/G)} \sim 10^{19}$ GeV.

Квантова механіка струн оперує з 10 просторовими і 1 часовим вимірами. Причому 3 просторових і 1 часовий вимір виявляються нескінченними, а решта — згорнутими. Чому 10 вимірів? Для 11 і більшого числа вимірів у теорії з'являються безмасові частинки зі спіном 2, що є неприйнятним з теоретичного та експериментального погляду.

Маси й заряди елементарних частинок визначаються модами коливань струн. А моди коливань залежать від розмірів і форми додаткових компактних вимірів. Мимоволі виникає аналогія зі скрипкою, в якій гармонійне поєднання чотирьох струн, класичної форми інструмента і резонаторних отворів визначають специфічний тембр звуку.

В реальному світі додаткові виміри згорнуті не в циліндричні поверхні, як припус-

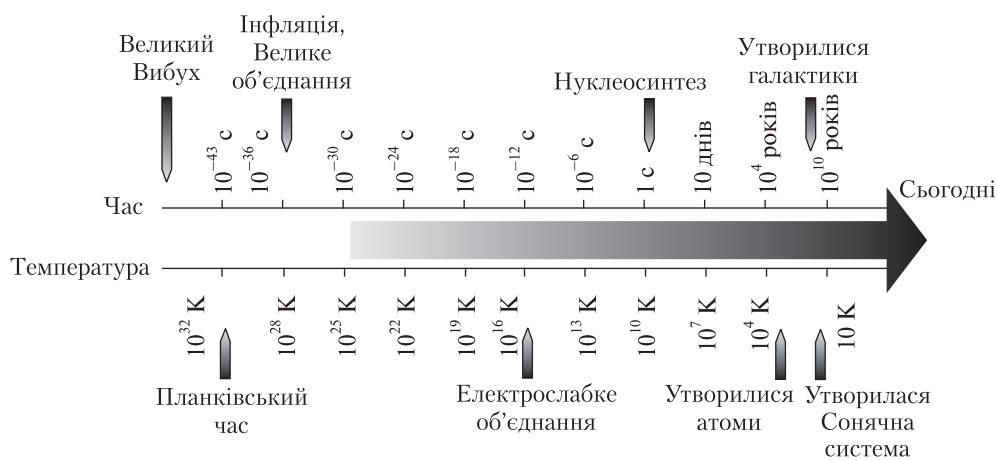
кали Калуца і Клейн, а в простори складнішої природи. У 1984 р. було знайдено, що рівняння теорії струн задовольняє клас 6-вимірних комплексних геометричних просторів Калабі — Яу.

Отже, наш Всесвіт містить додаткові виміри. Відповідно до теорії струн у кожній точці нашого простору є шість додаткових вимірів, згорнутих у химерну форму просторів Калабі — Яу. Ці виміри — невід'ємна частина структури нашого простору і є всюди. Вони настільки малі й так туго скручені, що не можуть бути виявлені за допомогою найсучаснішого експериментального обладнання. Розміри згорнутих вимірів становлять $\sim 10^{-33}$ см.

З ДОРОЖНЬОЇ КАРТИ ВСЕСВІТУ

Загальноприйнятою моделлю утворення Всесвіту є модель Великого Вибуху. Квантові ефекти відігравали вирішальну роль у планківську еру ($\sim 10^{-43}$ с від моменту народження Всесвіту). Вони мали велике значення аж до 10-денного віку Всесвіту, коли завершився нуклеосинтез і утворення атомів (див. рис.). При цьому Всесвіт являв собою розпечену масу з температурою близько 10 млрд градусів. Потім знадобився майже мільярд років для охолодження матерії та утворення Галактики і нашої Сонячної системи.

Трансформації речовини на рівні елементарних частинок відбувалися від моменту



Календар Всесвіту

часу, що обчислюється мізерно малою величиною близько 10^{-32} с, до приблизно однієї секунди від початку творення. Початок цієї епохи іменують *Великим об'єднанням*. Ще далі в глиб часів, протягом неуявно малого проміжку часу, від 10^{-34} до 10^{-32} с панувала *Інфляція*.

Модифікація моделі Великого Вибуху, що охоплює період експоненціального розширення на ранній стадії розвитку Всесвіту, називається *Інфляцією*. В типовому інфляційному сценарії експоненціальне розширення почалося приблизно в 10^{-34} с після початку часу і закінчилося, коли Всесвіт став у сотню разів старшим (тобто після приблизно 10^{-32} с). Упродовж цього інтервалу часу (так званої *Інфляційної епохи*) всі відстані у Всесвіті збільшилися приблизно в 10^{50} разів. Горизонт подій зріс із 10^{-24} см до 300 млн світлових років. Інфляція полягала радше в розширенні простору, ніж у русі частинок у ньому.

Інфляційний сценарій розвитку Всесвіту розробили у 80-ті роки Алан Гус [4] (Alan Guth) з Массачусетського технологічного інституту і Андрій Лінде [2] зі Стенфордського університету (США).

Отже, маємо таку картину світу. Зі співвідношення невизначеності $\Delta t \sim h/\Delta E$ випливає, що планківська енергія $\sim 10^{19}$ GeV відповідає вікові Всесвіту $\sim 10^{-43}$ с. Відразу після Планківської ери простір-час мав 11-вимірну структуру (10 просторових і один часовий вимір). Це була арена існування елементарних частинок, усі 10 просторових вимірів мали приблизно однаковий планківський розмір. Далі три виміри почали розширюватися до нескінченності, а решта (циклічні) — залишилися згорнутими. Розміри згорнутих вимірів становлять $\sim 10^{-33}$ см. Такими вони залишаються і понині. На великих масштабах Всесвіт набув звичного вигляду тривимірного просторового об'єкта.

У допланківську еру ($< \sim 10^{-43}$ с від моменту народження Всесвіту) самі поняття часу і простору втрачають фізичний сенс через квантові флуктуації. Перефразовуючи слова Іоанна Богослова, можна сказати: «Часу ще не було», втім, простору також...

ЯК І КОЛИ ПОНЯТТЯ ЧАСУ І ПРОСТОРУ ВТРАЧАЮТЬ ФІЗИЧНИЙ СЕНС

Народження Всесвіту належить до періоду Планківської ери, коли метрика простору-часу ще не описувалася рівняннями загальної теорії відносності (ЗТВ). У цей період просторові координати і час, що входять до рівнянь ЗТВ, не можуть слугувати засобом опису руху частинок матерії через квантово-механічне співвідношення невизначеності. Інакше кажучи, квантові флуктуації метрики виключають можливість розгляду еволюції Всесвіту на ранніх стадіях у термінах траєкторій і проміжків часу, тобто координатно-часового подання. Грубо кажучи, при цьому не можна чітко визначити, ЩО і ДЕ знаходиться та КОЛИ відбувається.

З фізичного погляду народження Всесвіту можна розглядати як квантовий стрибок, тобто квантовий перехід з допланківської ери в постпланківську. При цьому в квантовій фізиці вважається безглуздим ставити питання про просторову і часову структуру власне стрибка.

Відповідно до методології квантової фізики такий стрибок можна розглядати тільки в імовірнісному сенсі. При цьому обов'язково потрібно вказати всі можливі рівні переходів, а також імовірності переходів між рівнями (так звані матричні елементи). На етапі сучасних знань вказати це, на жаль, неможливо. Тому всі теорії, що не враховують фундаментальних основ квантової фізики, мають спекулятивний характер.

Те, що було ще раніше, називають по-різному: Допланківська ера, Pre-Big Bang, Досвітове існування Логосу... Більше про це знають лише пророки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дубровин Б.А., Новиков С.П., Фоменко А.Т. Современная геометрия. Методы и приложения. — М.: Наука, 1986. — 760 с.
2. Andrei Linde, Professor of Physics // <http://www.stanford.edu/~alinde/>.
3. Greene B. The Elegant Universe. Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory. — New York: Vintage Books, 2000. — 464 p.
4. Alan Guth, Victor F. Weisskopf Professor of Physics // http://web.mit.edu/physics/people/faculty/guth_alan.html.