The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Експеримент із холодними атомами перевіряє «проблему часу» квантової гравітації — як лабораторний аналог, а не відповідь

У канонічній квантовій гравітації рівняння Вілера—Де Вітта не містить зовнішнього годинника, що впорядковує події: це «проблема часу». Експеримент одного автора ізолює конденсат Бозе—Ейнштейна, ділить його тонким оптичним бар'єром на спостережуваний і неспостережуваний сектори та будує внутрішній годинник за ентропією, що тече між ними. Такий «ентропійний час» упорядковує розширення й повторне стискання спостережуваного сектора, а ефективне рівняння відтворює виміряні дані в розглянутому режимі низького бар'єра. Це контрольований стенд для ідей реляційного часу: «Великий вибух», «Велике стискання» і «міні-Всесвіт» — аналогові назви газу в пастці, а не справжня космологія; робота не стверджує, що розв'язала проблему часу або квантову гравітацію.

Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Testing the problem of time with cold atoms*, Giovanni Barontini, Physical Review Research 8, L022047 (2026) · DOI: 10.1103/1h9j-df4k

Годинник з ентропії всередині пастки

У канонічній квантовій гравітації є дивна й уперта загадка: у її центральному рівнянні відсутній час. Рівняння Вілера—Де Вітта, найближчий аналог рівняння Шредінгера для всього Всесвіту, просто говорить, що дія певного оператора на стан дає нуль. Немає зовнішнього параметра, який цокає й розташовує події в порядку «до» і «після», хоча ми явно відчуваємо плин часу. Це **проблема часу**, і вже понад пів століття вона не має остаточного розв'язання.

Стаття одного автора в *Physical Review Research* її не розв'язує. Вона робить дещо скромніше й по-своєму корисніше: створює невелику, добре контрольовану лабораторну систему, у якій одну родину запропонованих відповідей можна **перевірити на реальних даних**. Джованні Баронтіні з Бірмінгемського університету бере конденсат Бозе—Ейнштейна — хмару ультрахолодних атомів, що поводиться як єдиний квантовий об'єкт, — і перетворює її на аналог, на якому ідею «внутрішнього», реляційного часу можна вимірювати, а не лише обговорювати. Хитрість полягає в тому, щоб побудувати годинник не за зовнішнім секундоміром, а за ентропією, яку система перерозподіляє всередині себе.

Відстань між «контрольованим аналогом проблеми часу» і «фізики з'ясували, що таке час» — уся суть цієї історії, і відстань ця дуже велика.

Що зробив дослідник

Установка містить конденсат приблизно з **24 000 атомів рубідію-87**, утримуваних у консервативній оптичній дипольній пастці й приведених у коливальний рух: уся атомна хмара ходить туди-сюди вздовж пастки. **Тонкий оптичний бар'єр** завширшки близько 8 мікрометрів, намальований світлом із довжиною хвилі 675 нм за допомогою цифрового мікродзеркального пристрою, ділить пастку на дві половини. За однією половиною спостерігають — це «**світлий сектор**»; за іншою ні — це «**темний сектор**». Упродовж приблизно 100-мілісекундного експериментального вікна система не демонструє вимірюваної втрати частинок або дисипації, тому з хорошим наближенням є замкненою системою з гамільтоніаном, який сам не залежить від часу.

[figure_pair pending]

Ліворуч магнітооптична пастка створює холодну хмару атомів рубідію всередині скляної комірки — ранній етап охолодження на шляху до підготовки конденсату. Праворуч Джованні Баронтіні стоїть біля оптичної установки. Це фотографії лабораторної системи експерименту, а не зображення буквального мініатюрного Всесвіту.

Якщо дивитися на систему за звичайним лабораторним годинником — роблячи абсорбційне зображення кожні 2 мс, — світлий сектор поводиться доволі виразно. Атоми проходять крізь бар'єр, і сектор виникає з нічого — Баронтіні називає цей

момент «**Великим вибухом**», — досягає максимального розміру, потім стискається й спорожнюється назад у темний бік — «**Велике стискання**». Залежно від висоти бар'єра цикл може повторюватися.

Але далі починається власне експериментальна ідея. Лабораторний годинник *зовнішній* щодо системи — саме такий об'єкт заборонений у постановці Вілера—Де Вітта. Тому Баронтіні запитує: чи можна впорядкувати історію світлого сектора, використовуючи **лише величини всередині самої системи**? Його відповідь — годинник, який він називає **ентропійним часом** і зчитує з тих самих зображень у три зрозумілі кроки. По-перше, з кожного абсорбційного знімка він добуває чотири числа для світлого сектора: кількість атомів, центр мас профілю густини — аналог «скалярного поля», — його ширину та ентропію, тобто ентропію на атом, обчислену стандартним методом, помножену на кількість атомів. По-друге, коли атоми перетинають бар'єр, ця ентропія зростає й падає. По-третє, годинник слідує за градієнтом ентропії вздовж виміряної траєкторії центра мас, рахуючи величину кожного зміщення, а не його напрямок. Коли ентропія й центр мас зростають або падають разом, кожен крок переводить годинник уперед, навіть якщо хмара розвертається. У даних це майже всюди дає єдиний порядок від «Великого вибуху» сектора до його «Великого стискання»; є лише кілька невеликих коливань там, де грубе дискретизування змушує дві зміни розходитися.

Нарешті, автор виводить ефективне **«рівняння Шредінгера в ентропійному часі»** — рівняння еволюції світлого сектора, записане через внутрішній годинник замість зовнішнього, — і чисельно розв'язує його, щоб перевірити, чи відтворює воно те, що справді записала камера.

Що було виявлено

Три результати, від найскромнішого до найамбітнішого.

- **Внутрішній годинник працює як спосіб упорядкування.** Ентропійний час майже всюди зростає монотонно, а його швидкість визначається тим, наскільки швидко ентропія проходить крізь бар'єр: він іде швидше під час обміну ентропією і **повністю зупиняється, коли обміну немає**. У зворотному режимі з низьким бар'єром між одним Великим стисканням і наступним Великим вибухом *узагалі не минає внутрішнього часу*, бо в цей проміжок ентропія не обмінюється, хоча лабораторний годинник продовжує цокати. У всьому наборі даних сумарна ентропія обох секторів залишалася сталою в межах похибки, як і має бути для замкненої системи.
- **Різні режими дають різний «час».** Якщо підвищити бар'єр, обмін ентропією зменшується, тому внутрішній годинник іде повільніше. Коли два сектори майже перестають взаємодіяти, світлий сектор наближається до стану, який стаття називає «**тепловою смертю**»: стаціонарного стану, де ентропійний час просто зупиняється.
- **Ефективне рівняння відтворює дані.** Чисельний розв'язок рівняння Шредінгера

в ентропійному часі з експериментальними параметрами відтворює виміряну еволюцію ширини хмари. Стаття повідомляє про чудову відповідність для випадку низького бар'єра, де домінує член, пов'язаний з ентропією; явне чисельне порівняння виконано саме для цього режиму.

> **Що тут означають «проблема часу» та «ентропійний час»**
>
> **Проблема часу** полягає в тому, що основне рівняння канонічної квантової гравітації — рівняння Вілера—Де Вітта — не містить зовнішньої змінної часу. Одна з поширених відповідей є *реляційною*: вибрати фізичну величину всередині системи як «годинник» і описувати все інше відносно неї. Повторювана складність полягає в тому, що природні кандидати на роль годинника не завжди монотонні: у системі, яка розширюється, а потім стискається, такий годинник спочатку йде вперед, а потім назад, тому не може однозначно нумерувати весь шлях від початку до кінця.
> **Ентропійний час** — спосіб Баронтіні обійти цю проблему. Замість зчитування координатоподібної змінної він будує годинник з *ентропії*, якою обмінюються спостережуваний і неспостережуваний сектори, причому конструкція влаштована так, щоб не повертатися назад. За духом вона близька до давніших ідей «теплового часу», але тут час операційно визначається за вимірюваним потоком ентропії, а не за абстрактною математичною структурою. Саме тому його можна перевірити на реальній установці.
> Критично важливо: космологічні слова — «Великий вибух», «Велике стискання», «масштабний фактор», «скалярне поле», «міні-Всесвіт» — є **аналоговими позначеннями**. Вони називають особливості газу атомів у пастці, які *структурно схожі* на рівняння спрощених космологічних моделей. Це не твердження про справжній Всесвіт.

Чого це не доводить

Тут особливо потрібна обережність, бо словник роботи легко провокує перебільшення.

- **Робота не розв'язує проблему часу й не стверджує протилежного.** Автор прямо формулює результат як створення «контрольованого експериментального середовища, у якому реляційні конструкції часу можна кількісно перевіряти». Випробувальний стенд — не теорема. Питання, чи є реляційний або ентропійний час *правильним* описом часу в квантовій гравітації, залишається таким самим відкритим, як і раніше.
- **Це аналог, а не Всесвіт.** Жодної космології тут не спостерігають. Спостерігають конденсат Бозе—Ейнштейна в пастці, чий редукований опис *математично схожий* на спрощену космологічну модель типу мінісуперпростору. Подібність — сенс експерименту й водночас його межа. Робота не показує, що ранній Всесвіт пережив

Великий вибух такого типу, що простір-час складається з атомів або що «часу не існує».

- **Вона не показує, що час «насправді» є ентропією.** Ентропійний годинник — один сконструйований спосіб упорядкування, який добре працює в цій системі. Стаття відзначає концептуальну спорідненість із гіпотезою теплового часу, але прямо залишає відкритим навіть питання, чи збігаються ці ідеї. «Внутрішній годинник з ентропії може впорядкувати цей експеримент» — значно вужче твердження, ніж «час є ентропією».
- **Ефективне рівняння — результат моделювання, а не переписування квантової механіки.** Виведене рівняння Шредінгера в ентропійному часі зводиться до звичайної квантової механіки за повільного потоку ентропії та строго збігається зі звичайною унітарною теорією лише за повної відсутності потоку. Автор позиціонує його як загальніше за стандартне рівняння *саме тоді, коли спостережувана система термодинамічно відкрита щодо неспостережуваної.* Це твердження про відкриті підсистеми в установках такого типу, а не вимога переписати фундаментальну фізику.
- **Це один експеримент, один автор і один вибір годинника.** Статистична невизначеність становить приблизно 5% для кожної точки; аналіз спирається на наближення середнього поля та усередненої густини. Вибір годинника й спосіб укрупнення опису — навмисні модельні рішення, які іншим групам ще належить перевірити, перш ніж робити структурні висновки.

Наскільки сильними є докази

Для скромного твердження, яке робота справді робить, докази чисті. Система добре ізольована на відповідному часовому масштабі; баланс ентропії замикається — сумарна ентропія стала в межах похибки; внутрішній годинник майже всюди монотонно впорядковує дані; а ефективне рівняння, виведене автором із тієї самої моделі з параметрами, оціненими за даними, відтворює виміряну динаміку для застосованого випадку низького бар’єра. Дані перебувають у відкритому доступі. Це реальне вимірювання реальної керованої системи, а не уявний експеримент.

Відповідно скромною є й вага, яку результат може витримати. Усе спирається на аналогію між редукованою моделлю конденсату та космологією мінісуперпростору, а аналогії можуть прояснювати, але не доводити. Демонстрація на одній платформі одним автором того, що один рецепт внутрішнього часу працює, є сильним доказом принципу й слабкою підставою для тверджень про природу часу загалом. Правильне прочитання таке: тепер цей метод можна *реалізувати* в лабораторії та перевірити.

Чому це важливо

Суперечки про проблему часу довго залишалися на рівні формалізму, де конкуруючі пропозиції важко спростувати, бо вони дають мало конкретних вимірюваних передбачень. Перетворення хоча б частини цієї суперечки на відтворюваний експеримент — де внутрішній годинник або впорядковує дані, або ні, а ефективне рівняння або відповідає вимірюванням, або ні — змінює сам характер дискусії. Теоретики отримують лабораторний стенд для перевірки своїх конструкцій.

Саме це є справжнім внеском: не відповідь про час, а **місце, де питання можна ставити кількісно**. Платформи холодних атомів уже слугували керованими аналогами випромінювання Гокінга, Всесвітів, що розширюються, та розпаду хибного вакууму; ця робота додає до інструментарію реляційний час і стрілу часу. Цінність полягає в наступних дослідах, які вона робить можливими: інші варіанти годинника, відскок замість сингулярності, перевірки оборотності — тепер усе це може бути вимірюванням, а не лише розрахунком.

Короткий підсумок

Фізик створив конденсат Бозе—Ейнштейна, розділив його тонким оптичним бар'єром на спостережувану й неспостережувану половини та використав ентропію, що тече між ними, для побудови внутрішнього «ентропійного годинника». Цей годинник упорядковує цикл розширення й повторного стискання спостережуваної половини: іде швидко під час обміну ентропією та зупиняється, коли обміну немає. Ефективне рівняння, записане в такому внутрішньому часі, відтворює виміряні дані для дослідженого режиму низького бар'єра. Установка є аналогом «проблеми часу» з канонічної квантової гравітації: «Великий вибух», «Велике стискання» і «міні-Всесвіт» — позначення газу в пастці, математично схожого на спрощену космологічну модель. Це контрольований стенд для перевірки ідей реляційного часу, а не розв'язання проблеми часу, не твердження про реальний Всесвіт і не доказ того, що час «насправді» є ентропією.

Твереза оцінка

Що показує стаття: в одній добре ізольованій системі холодних атомів внутрішній годинник, визначений через обмін ентропією, може монотонно впорядковувати спостережувану динаміку, а ефективне рівняння в «ентропійному часі» відтворює виміряну еволюцію в розглянутому випадку низького бар'єра.

Що правдоподібно, але не показано: що ентропійний або реляційний час є хорошим описом часу в справжній квантовій гравітації. Експеримент підтримує серйозний розгляд таких конструкцій, але не підтверджує їх для природи.

Чого робота не показує: що проблему часу розв’язано; що квантову гравітацію побудовано; що Всесвіт почався з Великого вибуху такого типу; що простір-час виникає з атомів; або що «часу не існує».

Головні обмеження: одна платформа, один автор і один вибір годинника; приблизно 5% невизначеності на точку; наближення середнього поля й усередненої густини; і насамперед залежність від аналогії між конденсатом у пастці та спрощеною космологічною моделлю.

Наскільки впевненим може бути звичайний читач? Висока впевненість, що експеримент зробив те, про що повідомляється, у межах власної системи. Низька впевненість у будь-якому перенесенні цього аналога на твердження про час у реальному Всесвіті.

Джерела

Barontini, Testing the problem of time with cold atoms, Physical Review Research 8, L022047 (2026)
https://doi.org/10.1103/1h9j-df4k