The Clean Paper

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

Експеримент со ладни атоми го тестира „проблемот на времето“ во квантната гравитација — како лабораториски аналог, не како одговор

Во канонската квантна гравитација, Wheeler-DeWitt-овата равенка нема надворешен часовник што ги реди настаните: „проблемот на времето“. Експеримент со еден автор изолира Bose-Einstein-ов кондензат, го дели со тенка оптичка бариера на ненабљудуван и набљудуван сектор и гради внатрешен часовник од ентропијата што тече меѓу нив. Тоа „ентрописко време“ ги подредува ширењето и повторното собирање на набљудуваниот сектор, а ефективна равенка ги репродуцира измерените податоци во испитаниот случај со ниска бариера. Тоа е контролирана тест-платформа за идеи за релациско време: „big bang“, „big crunch“ и „miniuniverse“ се аналогни ознаки за заробен гас, не вистинска космологија, а трудот не тврди дека го решил проблемот на времето или квантната гравитација.

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

Часовник изграден од ентропија, внатре во стапица

Во канонската квантна гравитација постои чудна и упорна загатка: централната равенка воопшто нема време во себе. Wheeler-DeWitt-овата равенка, најблиското нешто до Schrodinger-ова равенка за целиот универзум, едноставно вели дека одреден оператор што дејствува врз состојбата дава нула. Нема надворешен параметар што „отчукува“, ништо што ги реди „пред“ и „потоа“ — а сепак очигледно го доживуваме минувањето на времето. Ова е **проблемот на времето**, и повеќе од половина век му одолева на решението.

Труд со еден автор во *Physical Review Research* не го решава. Она што го прави е потивко и, на свој начин, покорисно: гради мал, добро контролиран лабораториски систем во кој една фамилија предложени одговори може да се **тестира со реални податоци**. Giovanni Barontini од Универзитетот во Бирмингем зема Bose-Einstein-ов кондензат — облак од ултраладни атоми што се однесува како еден квантен објект — и го претвора во аналог на кој идејата за „внатрешно“, релациско време може да се мери наместо само да се расправа за неа. Трикот е часовникот да не се гради од надворешна штоперица, туку од ентропијата што системот ја прераспределува во самиот себе.

Растојанието меѓу „контролиран аналог на проблемот на времето“ и „физичарите го решија времето“ е целата приказна тука, и тоа е големо растојание.

Што направи истражувачот

Апаратот е кондензат од околу **24.000 атоми рубидиум-87** задржани во конзервативна оптичка диполна стапица и поставени да осцилираат — целиот атомски облак се ниша напред-назад низ стапицата. **Тенка оптичка бариера** — широка приближно 8 микрони, „исцртана“ со светлина од 675 nm преку дигитален микромирорски уред — ја дели стапицата на две половини. Едната половина се набљудува („**светлиот сектор**“); другата не („**темниот сектор**“). Во приближно 100-милисекундниот прозорец на експериментот системот не покажува мерливо губење честички или дисипација, па со добра апроксимација е затворен систем со Hamiltonian што самиот не зависи од времето.

[figure_pair pending]

Лево, магнето-оптичката стапица го создава студениот облак од атоми рубидиум во стаклената ќелија: рана фаза на ладење на патот кон подготовка на кондензатот. Десно, Giovanni Barontini стои покрај оптичкиот апарат. Ова се фотографии од лабораторискиот систем зад експериментот, не слики од буквален минијатурен универзум.

Гледан со обичен лабораториски часовник — апсорпциска слика на секои 2 ms — светлиот сектор прави нешто сугестивно. Атомите течат преку бариерата и секторот расте од ништо (Barontini го нарекува овој момент „**big bang**“), достигнува максимална

големина, потоа се собира и повторно се празни во темната страна („**big crunch**“). Во зависност од висината на бариерата, ова може циклично да се повторува.

Потоа доаѓа вистинската поента. Лабораторискиот часовник е *надворешен* на системот — токму видот нешто што поставката Wheeler-DeWitt не го дозволува. Затоа Barontini прашува: може ли историјата на светлиот сектор да се **подреди користејќи само величини внатрешни на системот**? Неговиот одговор е часовник што го нарекува **ентрописко време**, прочитан директно од истите слики во три едноставни чекори. Прво, од секоја апсорпциска слика извлекува четири броја за светлиот сектор: бројот на атоми, центарот на маса на неговиот густински профил (кој ја игра улогата на аналогно „скаларно поле“), неговата ширина и неговата ентропија — ентропијата по атом, добиена со стандарден метод, помножена со бројот на атоми. Второ, додека атомите ја преминуваат бариерата, таа ентропија расте и паѓа. Трето, часовникот го следи градиентот на ентропијата долж измерената патека на центарот на маса, броејќи ја големината на секое поместување, а не неговата насока. Кога ентропијата и центарот на маса растат или паѓаат заедно, секој чекор го придвижува часовникот напред дури и кога облакот ја менува насоката. Во податоците тоа дава единствено подредување од „big bang“ до „big crunch“ на секторот речиси насекаде, со само неколку мали нерамнини каде грубото временско примеркување прави тие две промени да не се согласуваат.

На крај, тој изведува ефективна **„Schrodinger-ова равенка во ентрописко време“** — равенка на еволуција за светлиот сектор напишана во однос на овој внатрешен часовник наместо надворешниот — и ја решава нумерички за да провери дали го репродуцира она што камерата навистина го снимила.

Што откри

Три резултати, по растечки ред на амбиција.

- **Внатрешниот часовник функционира како подредување.** Ентропиското време расте монотоно речиси насекаде, а неговата брзина ја одредува тоа колку брзо ентропијата ја преминува бариерата: часовникот оди побрзо кога се разменува ентропија и **целосно запира кога нема размена**. Во реверзибилниот режим со ниска бариера, *воопшто не минува внатрешно време* меѓу еден big crunch и следниот big bang — бидејќи таму не се разменува ентропија — иако лабораторискиот часовник продолжува да отчукува. Низ целиот збир податоци вкупната ентропија на двата сектора заедно останала константна во рамките на лентите на грешка, како што се бара за затворен систем.
- **Различни режими даваат различни „времиња“.** Зголемете ја бариерата и размената на ентропија се намалува, па внатрешниот часовник оди побавно. Зголемете ја до точка каде двата сектора едвај комуницираат, и светлиот сектор се приближува кон она што трудот го нарекува **„топлинска смрт“**: стационарна

состојба во која ентропиското време едноставно запира.

- **Ефективна равенка ги репродуцира податоците.** Schrodinger-овата равенка во ентрописко време, со внесени експериментални параметри, нумерички ја враќа измерената еволуција на ширината на облакот, при што трудот пријавува одлично совпаѓање за случајот со ниска бариера (каде доминира членот управуван од ентропијата); експлицитната нумеричка споредба е направена токму за тој случај.

> **Што е „проблемот на времето“ и што е „ентрописко време“ тука**
>
> **Проблемот на времето** е тоа што главната равенка на канонската квантна гравитација (Wheeler-DeWitt) нема надворешна временска променлива. Чест одговор е *релациски*: една физичка величина внатре во системот да се прогласи за „часовник“, а сè друго да се опишува во однос на неа. Повторлив проблем е што природните избори за часовник не секогаш се монотони — систем што повторно колабира го носи кандидатот-часовник напред, а потоа назад — па тој не може чисто да означи една насока од почеток до крај.
> **Ентропиското време** е начинот на Barontini да го заобиколи тоа. Наместо да чита величина слична на положба, тој го гради часовникот од *ентропијата* разменета меѓу набљудуваниот и ненабљудуваниот сектор, конструирана така што не се враќа наназад. По дух е блиско до постарите идеи за „thermal time“, но тука е оперативно дефинирано од мерлив проток на ентропија наместо од апстрактна математичка структура — токму затоа може да се тестира на реален апарат.
> Клучно, космолошките зборови — „big bang“, „big crunch“, „scale factor“, „scalar field“, „miniuniverse“ — се **аналогни ознаки**. Тие именуваат својства на заробен гас од атоми што случајно се *структурно слични* на равенките на поедноставени космолошки модели. Не се изјави за вистинскиот универзум.

Што ова не докажува

Тука претпазливоста е најважна, бидејќи вокабуларот лесно повикува на претерани заклучоци.

- **Не го решава проблемот на времето и не тврди дека го решава.** Самиот труд ја поставува работата како нешто што „воспоставува контролирана експериментална поставка во која конструкциите на релациско време можат квантитативно да се тестираат“. Тест-платформа не е теорема. Дали релациското или ентропиското време е *вистинскиот* опис на времето во квантната гравитација останува исто толку отворено како и порано.
- **Тоа е аналог, не универзумот.** Не се набљудува космологија. Се набљудува Bose-Einstein-ов кондензат во стапица, а неговиот редуциран опис е *математички сличен* на поедноставен („minisuperspace“) космолошки модел. Сличноста е целта на експериментот; таа е и неговата граница. Ништо тука не покажува дека раниот

универзум имал ваков big bang, дека простор-времето е направено од атоми или дека „времето не постои“.

- **Не покажува дека времето „навистина“ е ентропија.** Ентропискиот часовник е едно конструирано подредување што добро работи во овој систем. Трудот забележува концептуална сродност со хипотезата за thermal time, но експлицитно остава отворено дали двете воопшто се совпаѓаат. „Внатрешен часовник изграден од ентропија може да го подреди овој експеримент“ е многу потесно тврдење од „времето е ентропија“.
- **Ефективната равенка е резултат од моделирање, не препишување на квантната механика.** Изведената Schrodinger-ова равенка во ентрописко време се сведува на обична квантна механика кога протокот на ентропија е бавен, а строго е вообичаената унитарна теорија само кога воопшто нема проток на ентропија. Трудот ја поставува како поопшта од стандардната равенка *конкретно кога набљудуван систем е термодинамички отворен кон ненабљудуван* — тврдење за отворени потсистеми во ваков вид поставка, не тврдење дека фундаменталната физика мора да се препише на овој начин.
- **Тоа е еден експеримент, еден автор, еден избор на часовник.** Резултатите носат приближно 5% статистичка неизвесност по точка и се потпираат на апроксимации на средно поле и просечна густина. Избраниот часовник и coarse-graining се намерни моделирачки одлуки, од типот што други групи ќе сакаат да го испитаат пред да извлечат структурни заклучоци.

Колку се убедливи доказите?

За скромното нешто што всушност го тврди, доказите се чисти. Системот навистина е добро изолиран на релевантната временска скала, сметководството на ентропијата се затвора (вкупната ентропија е константна во рамките на грешката), внатрешниот часовник ги подредува податоците монотоно речиси насекаде, а ефективна равенка, изведена од авторот од истиот модел со параметри извлечени од податоците, ја репродуцира измерената динамика за случајот со ниска бариера на кој е применета. Податоците се јавно достапни. Ова е реално мерење на реален, контролабилен систем, не мисловен експеримент.

Товарот што може да го носи е соодветно скромен. Сè се потпира на аналогијата меѓу редуцираниот модел на кондензатот и minisuperspace-космологијата, а аналогиите осветлуваат без да докажуваат. Една платформа, од еден автор, што покажува дека еден рецепт за внатрешно време работи е силен proof of principle и слаба основа за какво било тврдење за тоа како времето се однесува во природата. Правилното читање е: методот сега е нешто што може да се *направи* во лабораторија и да се провери.

Зошто е важно

Дебатите за проблемот на времето долго беа заглавени на ниво на формализам, каде конкурентните предлози тешко се фалсификуваат бидејќи даваат малку конкретни, мерливи предвидувања. Претворањето барем еден агол од таа дебата во експеримент што може да се изведе — каде внатрешен часовник или ги подредува податоците или не, каде ефективна равенка или фитува или не — го менува карактерот на расправата. На теоретичарите им дава лабораториска клупа на која можат да ја тестираат својата машинерија.

Тоа е вистинскиот придонес: не одговор за времето, туку **место каде прашањето може квантитативно да се постави**. Платформите со ладни атоми веќе служеле како контролабилни аналози за Hawking-ово зрачење, проширувачки универзуми и распад на лажен вакуум; ова додава релациско време и стрела на времето во тој комплет алатки. Вредноста е во следните експерименти што ги овозможува — различни избори на часовник, отскок-наспроти сингуларно однесување, тестови на реверзибилност — секој сега како мерење, а не само пресметка.

Кратко резиме

Физичар изградил Bose-Einstein-ов кондензат, го поделил со тенка оптичка бариера на набљудувана и ненабљудувана половина и ја искористил ентропијата што тече меѓу половините за да конструира внатрешно „ентрописко време“. Тој часовник го подредува циклусот на ширење и повторно собирање на набљудуваната половина, оди брзо кога се разменува ентропија и запира кога нема размена, а ефективна равенка напишана во ова внатрешно време ги репродуцира измерените податоци во испитаниот случај со ниска бариера. Поставката е аналог на „проблемот на времето“ од канонската квантна гравитација: „big bang“, „big crunch“ и „miniuniverse“ се ознаки за заробен гас што математички наликува на поедноставен космолошки модел. Тоа е контролирана тест-платформа за идеи за релациско време — не решение на проблемот на времето, не тврдење за вистинскиот универзум и не доказ дека времето „навистина“ е ентропија.

Проверка без претерување

Што покажува трудот: Во еден добро изолиран систем со ладни атоми, внатрешен часовник дефиниран од размената на ентропија може монотоно да ја подреди набљудуваната динамика, а ефективна равенка во „ентрописко време“ ја репродуцира измерената еволуција во испитаниот случај со ниска бариера.

Што е веројатно, но не покажано: Дека ентропиското или релациското време е добар

опис на времето во вистинската квантна гравитација. Експериментот е во согласност со тоа ваквите конструкции сериозно да се разгледуваат; не ги потврдува за природата.

Што не покажува: Дека проблемот на времето е решен; дека квантната гравитација е решена; дека универзумот започнал со ваков big bang; дека простор-времето произлегува од атоми; или дека „времето не постои“.

Главни ограничувања: Една платформа, еден автор и еден избор на часовник; приближно 5% неизвесност по точка; апроксимации на средно поле и просечна густина; и, пред сè, потпирање на аналогија меѓу заробен кондензат и поедноставен космолошки модел.

Колкава доверба треба да има општ читател? Висока доверба дека експериментот го направил она што го пријавува во сопствениот систем. Ниска доверба во секој скок од овој аналог кон тврдења за времето во вистинскиот универзум.

Извори

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