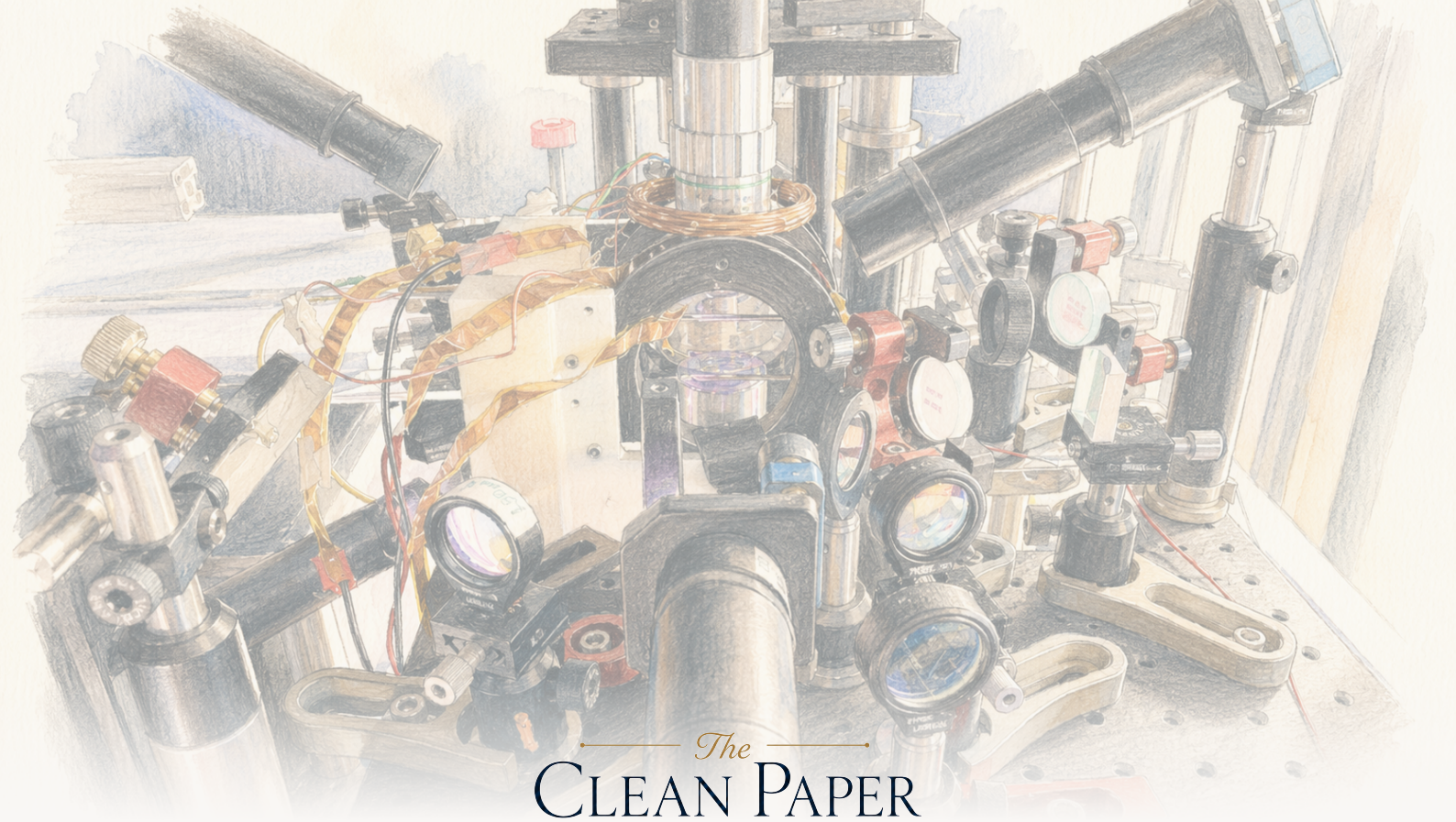

The Clean Paper

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

Эксперымент з халоднымі атамамі правярае «праблему часу» квантавай гравітацыі — як лабараторны аналаг, а не адказ

У кананічнай квантавай гравітацыі раўнанне Уілера—Дэ Віта не змяшчае вонкавага гадзінніка, які ўпарадкоўвае падзеі: гэта «праблема часу». Эксперымент аднаго аўтара ізалюе кандэнсат Бозэ—Эйнштэйна, дзеліць яго тонкім аптычным бар'ерам на назіраны і неназіраны сектары і будуе ўнутраны гадзіннік паводле энтрапіі, якая цячэ паміж імі. Такі «энтрапійны час» упарадкоўвае пашырэнне і паўторнае сціскане назіранага сектара, а эфектыўнае раўнанне аднаўляе вымераныя даныя ў разгледжаным рэжыме нізкага бар'ера. Гэта кантраляваны стэнд для ідэй рэляцыйнага часу: «Вялікі выбух», «Вялікае сціскане» і «міні-Сусвет» — аналагавыя назвы газу ў пастцы, а не сапраўдная касмалогія; праца не сцвярджае, што развязала праблему часу або квантавую гравітацыю.

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

Гадзіннік з энтрапіі ўнутры пасткі

У кананічнай квантавай гравітацыі ёсць дзіўная і ўпартая загадка: у яе цэнтральным раўнанні адсутнічае час. Раўнанне Уілера—Дэ Віта, найбліжэйшы аналаг раўнання Шродынгера для ўсяго Сусвету, проста кажа, што дзеянне пэўнага аператара на стан дае нуль. Няма вонкавага параметра, які цікае і размяшчае падзеі ў парадку «да» і «пасля», хоць мы відавочна адчуваем плынь часу. Гэта **праблема часу**, і ўжо больш за паўстагоддзя яна не мае канчатковага развязання.

Артыкул аднаго аўтара ў *Physical Review Research* яе не развязвае. Ён робіць нешта больш сціплае і па-свойму карыснейшае: стварае невялікую, добра кантраляваную лабараторную сістэму, у якой адну сям'ю прапанаваных адказаў можна **праверыць на рэальных даных**. Джавані Баронціні з Бірмінгемскага ўніверсітэта бярэ кандэнсат Бозэ—Эйнштэйна — воблака ўльтрахалодных атамаў, якое паводзіць сябе як адзіны квантавы аб'ект, — і ператварае яго ў аналаг, на якім ідэю «ўнутранага», рэляцыйнага часу можна вымяраць, а не толькі абмяркоўваць. Хітрасць у тым, каб пабудаваць гадзіннік не паводле вонкавага секундамеру, а паводле энтрапіі, якую сістэма пераразмяркоўвае ўнутры сябе.

Адлегласць паміж «кантраляваным аналагам праблемы часу» і «фізікі высветлілі, што такое час» — уся сутнасць гэтай гісторыі, і адлегласць гэта вельмі вялікая.

Што зрабіў даследчык

Устаноўка змяшчае кандэнсат прыкладна з **24 000 атамаў рубідыю-87**, утрыманых у кансерватыўнай аптычнай дыпольнай пастцы і прыведзеных у вагальны рух: усё атамнае воблака ходзіць туды-сюды ўздоўж пасткі. **Тонкі аптычны бар'ер** шырынёй каля 8 мікраметраў, намаляваны святлом з даўжынёй хвалі 675 нм з дапамогай лічбавай мікралюстраной прылады, дзеліць пастку на дзве паловы. За адной паловай назіраюць — гэта «**светлы сектар**»; за другой не назіраюць — гэта «**цёмны сектар**». Цягам прыкладна 100-мілісекунднага эксперыментальнага акна сістэма не дэманструе вымяральнай страты часціц або дысіпацыі, таму з добрым набліжэннем з'яўляецца замкнёнай сістэмай з гамільтаніянам, які сам не залежыць ад часу.

[figure_pair pending]

Злева магнітааптычная пастка стварае халоднае воблака атамаў рубідыю ўнутры шкляной ячэйкі — ранні этап ахалоджвання на шляху да падрыхтоўкі кандэнсату. Справа Джавані Баронціні стаіць каля аптычнай устаноўкі. Гэта фотаздымкі лабараторнай сістэмы эксперыменту, а не выявы літаральнага мініяцюрнага Сусвету.

Калі глядзець на сістэму паводле звычайнага лабараторнага гадзінніка — робячы абсарбцыйную выяву кожныя 2 мс, — светлы сектар паводзіць сябе даволі выразна. Атамы праходзяць праз бар'ер, і сектар узнікае з нічога — Баронціні называе гэты

момант «**Вялікім выбухам**», — дасягае максімальнага памеру, потым сціскаецца і спусташаецца назад у цёмны бок — «**Вялікае сціскание**». У залежнасці ад вышыні бар'ера цыкл можа паўтарацца.

Але далей пачынаецца ўласна эксперыментальная ідэя. Лабараторны гадзіннік *вонкавы* адносна сістэмы — менавіта такі аб'ект забаронены ў пастаноўцы Уілера—Дэ Віта. Таму Баронціні пытаецца: ці можна ўпарадкаваць гісторыю светлага сектара, выкарыстоўваючы **толькі велічыні ўнутры самой сістэмы**? Яго адказ — гадзіннік, які ён называе **энтрапійным часам** і счытвае з тых самых выяў у тры зразумелыя крокі. Па-першае, з кожнага абсарбцыйнага здымка ён здабывае чатыры лікі для светлага сектара: колькасць атамаў, цэнтр мас профілю шчыльнасці — аналаг «скалярнага поля», — яго шырыню і энтрапію, то-бок энтрапію на атам, вылічаную стандартным метадам, памножаную на колькасць атамаў. Па-другое, калі атамы перасякаюць бар'ер, гэтая энтрапія расце і падае. Па-трэцяе, гадзіннік ідзе за градыентам энтрапіі ўздоўж вымеранай траекторыі цэнтра мас, лічачы велічыню кожнага зрушэння, а не яго кірунак. Калі энтрапія і цэнтр мас растуць або падаюць разам, кожны крок пераводзіць гадзіннік наперад, нават калі воблака разгортваецца. У даных гэта амаль паўсюль дае адзіны парадак ад «Вялікага выбуху» сектара да яго «Вялікага сціскання»; ёсць толькі некалькі невялікіх ваганняў там, дзе грубая дыскрэтызацыя прымушае дзве змены разыходзіцца.

Нарэшце, аўтар выводзіць эфектыўнае **«раўнанне Шродынгера ў энтрапійным часе»** — раўнанне эвалюцыі светлага сектара, запісанае праз унутраны гадзіннік замест вонкавага, — і лікава развязвае яго, каб праверыць, ці аднаўляе яно тое, што сапраўды запісала камера.

Што было выяўлена

Тры вынікі, ад найбольш сціплага да найбольш амбіцыйнага.

- **Унутраны гадзіннік працуе як спосаб упарадкавання.** Энтрапійны час амаль паўсюль расце манатонна, а яго хуткасць вызначаецца тым, наколькі хутка энтрапія праходзіць праз бар'ер: ён ідзе хутчэй падчас абмену энтрапіяй і **цалкам спыняецца, калі абмену няма**. У зваротным рэжыме з нізкім бар'ерам паміж адным Вялікім сціскaннем і наступным Вялікім выбухам *увогуле не мінае ўнутранага часу*, бо ў гэты прамежак энтрапія не абменьваецца, хоць лабараторны гадзіннік працягвае цікаць. Ва ўсім наборы даных сумарная энтрапія абодвух сектараў заставалася сталай у межах хібнасці, як і павінна быць для замкнёнай сістэмы.
- **Розныя рэжымы даюць розны «час».** Калі павысіць бар'ер, абмен энтрапіяй змяншаецца, таму ўнутраны гадзіннік ідзе павольней. Калі два сектары амаль перастаюць узаемадзейнічаць, светлы сектар набліжаецца да стану, які артыкул называе «**цеплавой смерцю**»: стацыянарнага стану, дзе энтрапійны час проста спыняецца.

- **Эфектыўнае раўнанне аднаўляе даныя.** Лікавае развязанне раўнання Шродынгера ў энтрапійным часе з эксперыментальнымі параметрамі аднаўляе вымераную эвалюцыю шырыні воблака. Артыкул паведамляе пра выдатную адпаведнасць для выпадку нізкага бар'ера, дзе дамінуе складнік, звязаны з энтрапіяй; відавочнае лікавае параўнанне выканана менавіта для гэтага рэжыму.

> **Што тут азначаюць «праблема часу» і «энтрапійны час»**
>
> **Праблема часу** заключаецца ў тым, што асноўнае раўнанне кананічнай квантавай гравітацыі — раўнанне Уілера—Дэ Віта — не змяшчае вонкавай зменнай часу. Адзін з распаўсюджаных адказаў з'яўляецца *рэляцыйным*: выбраць фізічную велічыню ўнутры сістэмы ў якасці «гадзінніка» і апісваць усё астатняе адносна яе. Паўторная складанасць у тым, што натуральныя кандыдаты на ролю гадзінніка не заўсёды манатонныя: у сістэме, якая пашыраецца, а потым сціскаецца, такі гадзіннік спачатку ідзе наперад, а потым назад, таму не можа адназначна нумараваць увесь шлях ад пачатку да канца.
> **Энтрапійны час** — спосаб Баронціні абысці гэтую праблему. Замест счытвання каардынатападобнай зменнай ён будуе гадзіннік з *энтрапіі*, якой абменьваюцца назіраны і неназіраны сектары, прычым канструкцыя ўладкаваная так, каб не вяртацца назад. Паводле духу яна блізкая да даўнейшых ідэй «цеплавога часу», але тут час аперацыйна вызначаецца паводле вымяральнага патоку энтрапіі, а не паводле абстрактнай матэматычнай структуры. Менавіта таму яго можна праверыць на рэальнай устаноўцы.
> Крытычна важна: касмалагічныя словы — «Вялікі выбух», «Вялікае сціскане», «маштабны фактар», «скалярнае поле», «міні-Сусвет» — з'яўляюцца **аналагавымі абазначэннямі**. Яны называюць асаблівасці газу атамаў у пастцы, якія *структурна падобныя* да раўнанняў спрошчаных касмалагічных мадэляў. Гэта не сцвярджэнне пра сапраўдны Сусвет.

Чаго гэта не даказвае

Тут асабліва патрэбная асцярожнасць, бо слоўнік працы лёгка правакуе перабольшанне.

- **Праца не развязвае праблему часу і не сцвярджае адваротнага.** Аўтар непасрэдна фармулюе вынік як стварэнне «кантраляванага эксперыментальнага асяроддзя, у якім рэляцыйныя канструкцыі часу можна колькасна правяраць». Выпрабавальны стэнд — не тэарэма. Пытанне, ці з'яўляецца рэляцыйны або энтрапійны час *правільным* апісаннем часу ў квантавай гравітацыі, застаецца такім жа адкрытым, як і раней.
- **Гэта аналаг, а не Сусвет.** Ніякай касмалогіі тут не назіраюць. Назіраюць кандэнсат Бозэ—Эйнштэйна ў пастцы, чый рэдукаваны апісальны фармалізм *матэматычна падобны* да спрошчанай касмалагічнай мадэлі тыпу мінісуперпрасторы. Падабенства

— сэнс эксперыменту і адначасова яго мяжа. Праца не паказвае, што ранні Сусвет перажыў Вялікі выбух такога тыпу, што прастора-час складаецца з атамаў або што «часу не існуе».

- **Яна не паказвае, што час «насамрэч» з'яўляецца энтрапіяй.** Энтрапійны гадзіннік — адзін сканструяваны спосаб упарадкавання, які добра працуе ў гэтай сістэме. Артыкул адзначае канцэптуальную роднасць з гіпотэзай цеплавога часу, але наўпрост пакідае адкрытым нават пытанне, ці супадаюць гэтыя ідэі. «Унутраны гадзіннік з энтрапіі можа ўпарадкаваць гэты эксперымент» — значна вузейшае сцвярджэнне, чым «час ёсць энтрапія».
- **Эфектыўнае раўнанне — вынік мадэлявання, а не перапісванне квантавай механікі.** Выведзенае раўнанне Шродынгера ў энтрапійным часе зводзіцца да звычайнай квантавай механікі пры павольным патоку энтрапіі і строга супадае са звычайнай унітарнай тэорыяй толькі пры поўнай адсутнасці патоку. Аўтар пазіцыянуе яго як больш агульнае за стандартнае раўнанне *менавіта тады, калі назіраная сістэма тэрмадынамічна адкрытая адносна неназіранай.* Гэта сцвярджэнне пра адкрытыя падсістэмы ва ўстаноўках такога тыпу, а не патрабаванне перапісаць фундаментальную фізіку.
- **Гэта адзін эксперымент, адзін аўтар і адзін выбар гадзінніка.** Статыстычная нявызначанасць складае прыкладна 5% для кожнага пункта; аналіз абапіраецца на набліжэнне сярэдняга поля і асераднёнай шчыльнасці. Выбар гадзінніка і спосаб узбуйнення апісання — наўмысныя мадэльныя рашэнні, якія іншым групам яшчэ трэба праверыць, перш чым рабіць структурныя высновы.

Наколькі моцныя доказы

Для сціплага сцвярджэння, якое праца сапраўды робіць, доказы чыстыя. Сістэма добра ізаляваная на адпаведным часавым маштабе; баланс энтрапіі замыкаецца — сумарная энтрапія сталая ў межах хібнасці; унутраны гадзіннік амаль паўсюль манатонна ўпарадкоўвае даныя; а эфектыўнае раўнанне, выведзенае аўтарам з той самай мадэлі з параметрамі, ацэненымі паводле даных, аднаўляе вымераную дынаміку для ўжытага выпадку нізкага бар'ера. Даныя знаходзяцца ў адкрытым доступе. Гэта рэальнае вымярэнне рэальнай кіраванай сістэмы, а не ўяўны эксперымент.

Адпаведна сціплай з'яўляецца і вага, якую вынік можа вытрымаць. Усё абапіраецца на аналогію паміж рэдукаванай мадэллю кандэнсату і касмалогіяй мінісуперпрасторы, а аналогіі могуць праясняць, але не даказваць. Дэманстрацыя на адной платформе адным аўтарам таго, што адзін рэцэпт унутранага часу працуе, — моцны доказ прынцыпу і слабая падстава для сцвярджэнняў пра прыроду часу ў цэлым. Правільнае прачытанне такое: цяпер гэты метад можна *рэалізаваць* у лабараторыі і праверыць.

Чаму гэта важна

Спрэчкі пра праблему часу доўга заставаліся на ўзроўні фармалізму, дзе канкуруючыя прапановы цяжка абвергнуць, бо яны даюць мала канкрэтных вымяральных прадказанняў. Ператварэнне хаця б часткі гэтай спрэчкі ў узнаўляльны эксперымент — дзе ўнутраны гадзіннік або ўпарадкоўвае даныя, або не, а эфектыўнае раўнанне або адпавядае вымярэнням, або не — змяняе сам характар дыскусіі. Тэарэтыкі атрымліваюць лабараторны стэнд для праверкі сваіх канструкцый.

Менавіта гэта з'яўляецца сапраўдным унёскам: не адказ пра час, а **месца, дзе пытанне можна ставіць колькасна**. Платформы халодных атамаў ужо служылі кіраванымі аналагамі выпраменьвання Хокінга, Сусветаў, якія пашыраюцца, і распаду ілжывага вакууму; гэтая праца дадае да інструментарыю рэляцыйны час і стралу часу. Каштоўнасць заключаецца ў наступных доследах, якія яна робіць магчымымі: іншыя варыянты гадзінніка, адскок замест сінгулярнасці, праверкі абарачальнасці — цяпер усё гэта можа быць вымярэннем, а не толькі разлікам.

Кароткі вынік

Фізік стварыў кандэнсат Бозэ—Эйнштэйна, падзяліў яго тонкім аптычным бар'ерам на назіраную і неназіраную паловы і выкарыстаў энтрапію, што цячэ паміж імі, для пабудовы ўнутранага «энтрапійнага гадзінніка». Гэты гадзіннік упарадкоўвае цыкл пашырэння і паўторнага сціскання назіранай паловы: ідзе хутка падчас абмену энтрапіяй і спыняецца, калі абмену няма. Эфектыўнае раўнанне, запісанае ў такім унутраным часе, аднаўляе вымераныя даныя для даследаванага рэжыму нізкага бар'ера. Устаноўка з'яўляецца аналагам «праблемы часу» з кананічнай квантавай гравітацыі: «Вялікі выбух», «Вялікае сціскане» і «міні-Сусвет» — абазначэнні газу ў пастцы, матэматычна падобнага да спрошчанай касмалагічнай мадэлі. Гэта кантраляваны стэнд для праверкі ідэй рэляцыйнага часу, а не развязанне праблемы часу, не сцвярджэнне пра рэальны Сусвет і не доказ таго, што час «насамрэч» з'яўляецца энтрапіяй.

Праверка без перабольшанняў

Што паказвае артыкул: у адной добра ізаляванай сістэме халодных атамаў унутраны гадзіннік, вызначаны праз абмен энтрапіяй, можа манатонна ўпарадкоўваць назіраную дынаміку, а эфектыўнае раўнанне ў «энтрапійным часе» аднаўляе вымераную эвалюцыю ў разгледжаным выпадку нізкага бар'ера.

Што праўдападобна, але не паказана: што энтрапійны або рэляцыйны час з'яўляецца добрым апісаннем часу ў сапраўднай квантавай гравітацыі. Эксперымент падтрымлівае сур'ёзны разгляд такіх канструкцый, але не пацвярджае іх для прыроды.

Чаго праца не паказвае: што праблема часу развязаная; што квантавая гравітацыя пабудаваная; што Сусвет пачаўся з Вялікага выбуху такога тыпу; што прастора-час узнікае з атамаў; або што «часу не існуе».

Галоўныя абмежаванні: адна платформа, адзін аўтар і адзін выбар гадзінніка; прыкладна 5% нявызначанасці на пункт; набліжэнне сярэдняга поля і асераднёнай шчыльнасці; і найперш залежнасць ад аналогіі паміж кандэнсатам у пастцы і спрошчанай касмалагічнай мадэллю.

Наколькі ўпэўненым можа быць звычайны чытач? Высокая ўпэўненасць, што эксперымент зрабіў тое, пра што паведамляецца, у межах уласнай сістэмы. Нізкая ўпэўненасць у любым пераносе гэтага аналога на сцвярджэнні пра час у рэальным Сусвеце.

Крыніцы

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