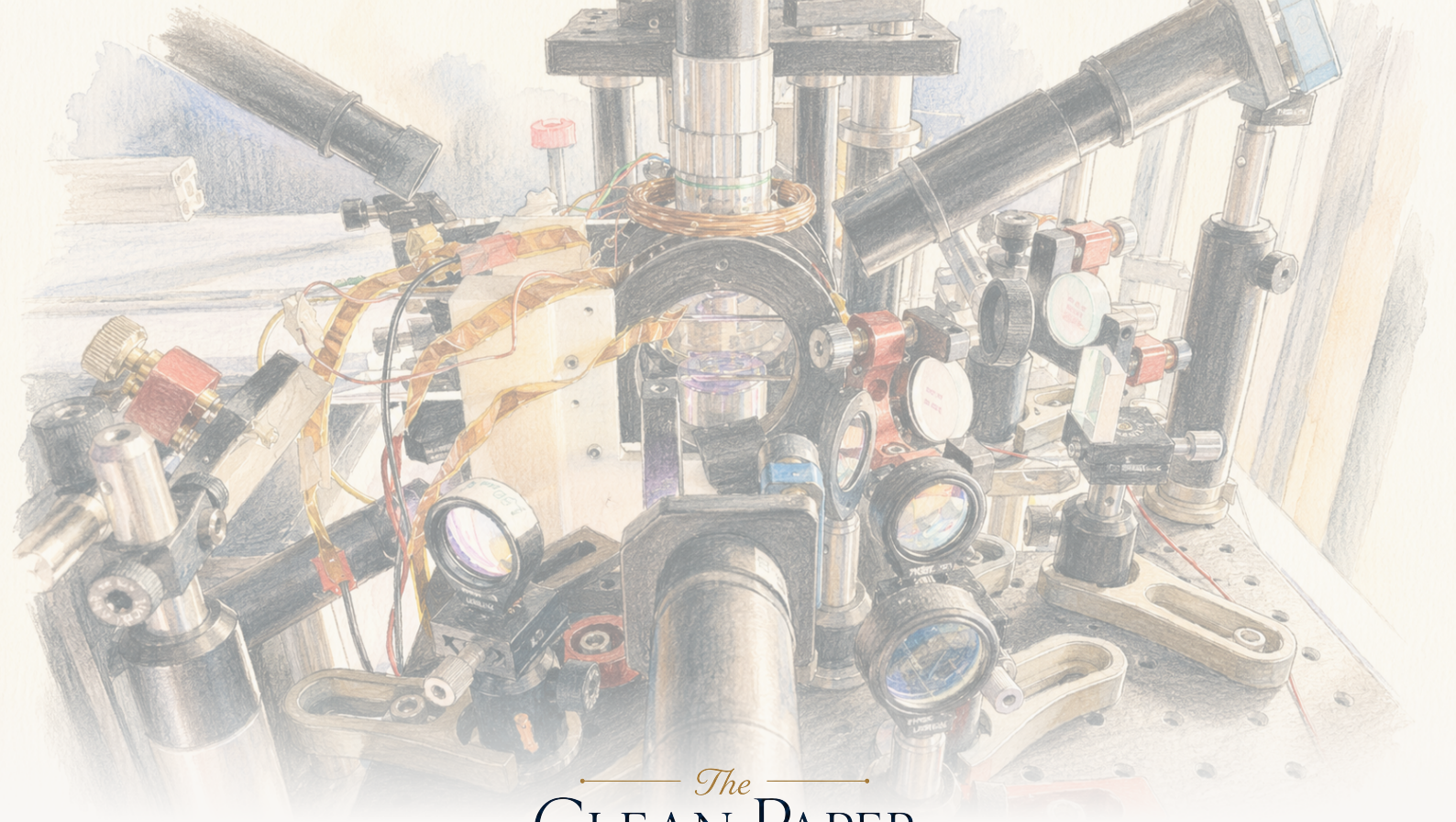

The
CLEAN PAPER

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

Un esperimento con atomi freddi mette alla prova il «problema del tempo» della gravità quantistica: come analogo di laboratorio, non come risposta

Nella gravità quantistica canonica, l'equazione di Wheeler-DeWitt non contiene un orologio esterno che ordini gli eventi: è il «problema del tempo». Un esperimento condotto da un solo autore isola un condensato di Bose-Einstein, lo divide con una sottile barriera ottica in un settore non osservato e uno osservato e costruisce un orologio interno dall'entropia che fluisce tra essi. Questo «tempo entropico» ordina l'espansione e il ricollasso del settore osservato e un'equazione efficace riproduce i dati misurati nel caso a barriera bassa esaminato. È un banco di prova controllato per le idee di tempo relazionale: «big bang», «big crunch» e «miniuniverso» sono etichette analogiche per un gas confinato, non vera cosmologia, e il lavoro non sostiene di aver risolto il problema del tempo o la gravità quantistica.

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

Un orologio costruito con l'entropia, dentro una trappola

Nella gravità quantistica canonica esiste un enigma strano e ostinato: l'equazione centrale non contiene il tempo. L'equazione di Wheeler-DeWitt, ciò che più somiglia a un'equazione di Schrödinger per l'intero universo, afferma semplicemente che un certo operatore applicato allo stato dà zero. Non esiste un parametro esterno che scandisca il tempo, nulla che ordini un «prima» e un «dopo»; eppure sperimentiamo chiaramente il suo scorrere. È il **problema del tempo**, rimasto irrisolto per più di mezzo secolo.

Un articolo con un solo autore pubblicato su *Physical Review Research* non lo risolve. Fa qualcosa di più discreto e, a suo modo, più utile: costruisce un piccolo sistema di laboratorio ben controllato, nel quale una famiglia di risposte proposte può essere **messa alla prova con dati reali**. Giovanni Barontini, dell'Università di Birmingham, prende un condensato di Bose-Einstein — una nube di atomi ultrafreddi che si comporta come un unico oggetto quantistico — e lo trasforma in un analogo sul quale l'idea di un tempo «interno» e relazionale può essere misurata, anziché soltanto discussa. Il trucco è costruire un orologio non da un cronometro esterno, ma dall'entropia che il sistema redistribuisce al proprio interno.

La distanza tra «un analogo controllato del problema del tempo» e «i fisici hanno risolto il tempo» è l'intera storia, ed è una distanza molto grande.

Che cosa ha fatto il ricercatore

L'apparato consiste in un condensato di circa **24.000 atomi di rubidio-87**, confinato in una trappola ottica dipolare conservativa e messo in oscillazione: l'intera nube atomica si muove avanti e indietro nella trappola. Una **sottile barriera ottica**, larga circa 8 micrometri e disegnata con luce a 675 nm mediante un dispositivo digitale a micromirror, divide la trappola in due metà. Una viene osservata — il «**settore luminoso**» — e l'altra no — il «**settore oscuro**». Nella finestra sperimentale di circa 100 millisecondi, il sistema non mostra perdite di particelle o dissipazione misurabili, per cui è, con buona approssimazione, un sistema chiuso con un'hamiltoniana che non dipende essa stessa dal tempo.

[figure_pair pending]

A sinistra, la trappola magneto-ottica produce la nube fredda di atomi di rubidio all'interno della cella di vetro: una fase iniziale di raffreddamento lungo il percorso verso la preparazione del condensato. A destra, Giovanni Barontini accanto all'apparato ottico. Sono fotografie del sistema di laboratorio alla base dell'esperimento, non immagini di un vero universo in miniatura.

Osservato con un normale orologio di laboratorio — un'immagine per assorbimento ogni 2 ms — il settore luminoso compie qualcosa di evocativo. Gli atomi attraversano la barriera e il settore cresce dal nulla — Barontini chiama questo istante «**big bang**» — raggiunge un'estensione massima, poi si contrae e si svuota tornando nel lato oscuro — il «**big crunch**». A seconda dell'altezza della barriera, il ciclo può ripetersi.

Qui arriva il punto vero. L'orologio di laboratorio è *esterno* al sistema, esattamente il tipo di elemento che il contesto di Wheeler-DeWitt non ammette. Barontini chiede quindi: si può **ordinare la storia del settore luminoso usando soltanto quantità interne al sistema**? La sua risposta è un orologio che chiama **tempo entropico**, ricavato direttamente dalle stesse immagini in tre passaggi semplici. Primo: da ogni immagine per assorbimento estrae quattro numeri per il settore luminoso — il numero di atomi, il centro di massa del profilo di densità, che svolge il ruolo di un «campo scalare» analogo, la larghezza e l'entropia, ottenuta moltiplicando l'entropia per atomo ricavata con un metodo standard per il numero di atomi. Secondo: mentre gli atomi attraversano la barriera, questa entropia aumenta e diminuisce. Terzo: l'orologio segue il gradiente dell'entropia lungo il percorso misurato del centro di massa, contando il valore assoluto di ogni spostamento anziché la sua direzione. Quando entropia e centro di massa aumentano o diminuiscono insieme, ogni passo fa avanzare l'orologio anche se la nube inverte il moto. Nei dati, ciò fornisce quasi ovunque un unico ordinamento dal «big bang» al «big crunch» del settore, con soltanto alcune piccole oscillazioni nei punti in cui il campionamento grossolano fa divergere le due variazioni.

Infine, deriva un'**«equazione di Schrödinger nel tempo entropico»** efficace — un'equazione di evoluzione del settore luminoso scritta rispetto a questo orologio interno anziché a quello esterno — e la risolve numericamente per verificare se riproduca ciò che la telecamera ha realmente registrato.

Che cosa ha trovato

Tre risultati, in ordine crescente di ambizione.

- **L'orologio interno funziona come ordinamento.** Il tempo entropico cresce quasi ovunque in modo monotono e la sua velocità è determinata dalla rapidità con cui l'entropia attraversa la barriera: scorre più velocemente quando vi è uno scambio di entropia e **si arresta completamente quando non ve n'è**. Nel regime reversibile a barriera bassa, tra un big crunch e il big bang successivo *non passa alcun tempo interno*, perché in quell'intervallo non viene scambiata entropia, anche se l'orologio di laboratorio continua a scorrere. Nell'intero insieme di dati, l'entropia totale dei due settori insieme è rimasta costante entro le barre d'errore, come richiesto da un sistema chiuso.
- **Regimi diversi producono «tempi» diversi.** Aumentando la barriera, lo scambio di entropia diminuisce e l'orologio interno rallenta. Quando la barriera viene portata al punto in cui i due settori comunicano appena, il settore luminoso tende verso ciò che l'articolo chiama una «**morte termica**»: uno stato stazionario nel quale il tempo entropico semplicemente si ferma.
- **Un'equazione efficace riproduce i dati.** L'equazione di Schrödinger nel tempo entropico, alimentata con i parametri sperimentali, ricostruisce numericamente l'evoluzione misurata della larghezza della nube. L'articolo riferisce un accordo eccellente per il caso a barriera bassa — quello in cui domina il termine guidato dall'entropia — ed è per questo caso che viene presentato il confronto numerico esplicito.

Che cosa sono qui il «problema del tempo» e il «tempo entropico»

Il **problema del tempo** nasce dal fatto che l'equazione fondamentale della gravità quantistica canonica, Wheeler-DeWitt, non contiene una variabile temporale esterna. Una risposta comune è *relazionale*: promuovere una quantità fisica interna al sistema al ruolo di «orologio» e descrivere tutto il resto rispetto a essa. Una difficoltà ricorrente è che le scelte naturali per l'orologio non sono sempre monotone: in un sistema che ricollassa, l'orologio candidato procede prima in avanti e poi all'indietro, per cui non può etichettare chiaramente un'unica direzione dall'inizio alla fine.

Il **tempo entropico** è il modo con cui Barontini aggira il problema. Invece di leggere una variabile simile a una posizione, costruisce l'orologio dall'*entropia* scambiata tra i settori osservato e non osservato, in modo che non inverta la direzione. L'idea è affine nello spirito a proposte precedenti sul «tempo termico», ma qui è definita operativamente da un flusso di entropia misurabile, anziché da una struttura matematica astratta: è proprio questo a renderla verificabile su un apparato reale.

È essenziale ricordare che le parole cosmologiche — «big bang», «big crunch», «fattore di scala», «campo scalare», «miniuniverso» — sono **etichette analogiche**. Nominano caratteristiche di un gas di atomi confinato che risultano *strutturalmente simili* alle equazioni di modelli cosmologici semplificati. Non sono affermazioni sull'universo reale.

Che cosa non dimostra

È qui che serve maggiore cautela, perché il vocabolario invita a eccedere.

- **Non risolve il problema del tempo e non sostiene di farlo.** La stessa formulazione dell'articolo afferma che il lavoro «stabilisce un contesto sperimentale controllato nel quale le costruzioni del tempo relazionale possono essere verificate quantitativamente». Un banco di prova non è un teorema. La questione se il tempo relazionale o entropico sia la descrizione *corretta* del tempo nella gravità quantistica rimane esattamente aperta come prima.
- **È un analogo, non l'universo.** Non viene osservata alcuna cosmologia. Viene osservato un condensato di Bose-Einstein in una trappola, la cui descrizione ridotta è *matematicamente simile* a un modello cosmologico semplificato, detto di minisuperspazio. La somiglianza è lo scopo dell'esperimento ed è anche il suo confine. Nulla qui mostra che l'universo primordiale abbia avuto un big bang di questo tipo, che lo spaziotempo sia fatto di atomi o che «il tempo non esista».
- **Non dimostra che il tempo sia «davvero» entropia.** L'orologio entropico è un particolare ordinamento costruito che funziona bene in questo sistema. L'articolo nota un'affinità concettuale con l'ipotesi del tempo termico, ma lascia esplicitamente aperta persino la questione se i due coincidano. «Un orologio interno costruito dall'entropia può ordinare questo esperimento» è un'affermazione molto più ristretta di «il tempo è entropia».
- **L'equazione efficace è un risultato di modellistica, non una riscrittura della meccanica quantistica.** L'equazione di Schrödinger nel tempo entropico derivata si riduce alla normale meccanica quantistica quando il flusso di entropia è lento ed è rigorosamente la consueta teoria

unitaria soltanto quando non fluisce alcuna entropia. L'articolo la presenta come più generale dell'equazione standard *specificamente quando un sistema osservato è termodinamicamente aperto verso uno non osservato*: un'affermazione sui sottosistemi aperti in questo tipo di apparato, non la pretesa che la fisica fondamentale debba essere riscritta così.

- **È un esperimento, un autore e una scelta di orologio.** I risultati presentano un'incertezza statistica di circa il 5% per punto e si appoggiano ad approssimazioni di campo medio e di densità mediata. L'orologio scelto e il coarse-graining sono decisioni modellistiche deliberate, del tipo che altri gruppi vorranno esaminare prima di trarre conclusioni strutturali.

Quanto sono solide le prove?

Per l'affermazione modesta che compie davvero, le prove sono pulite. Il sistema è realmente ben isolato sulla scala temporale rilevante; il bilancio dell'entropia si chiude — l'entropia totale è costante entro gli errori; l'orologio interno ordina i dati in modo monotono quasi ovunque; e un'equazione efficace, derivata dall'autore dallo stesso modello con parametri inferiti dai dati, riproduce la dinamica misurata nel caso a barriera bassa al quale è stata applicata. I dati sono disponibili pubblicamente. È una misura reale di un sistema reale e controllabile, non un esperimento mentale.

Il peso che può sopportare è altrettanto modesto. Tutto si basa sull'analogia tra il modello ridotto del condensato e la cosmologia di minisuperspazio, e le analogie illuminano senza dimostrare. Una singola piattaforma, studiata da un solo autore, che mostra il funzionamento di una ricetta per il tempo interno è una forte prova di principio e una base debole per qualunque affermazione su come il tempo si comporti in natura. La lettura corretta è: il metodo è ora qualcosa che si può *fare* in laboratorio e verificare.

Perché è importante

Il dibattito sul problema del tempo è rimasto a lungo bloccato al livello del formalismo, dove le proposte concorrenti sono difficili da falsificare perché producono poche previsioni concrete e misurabili. Trasformare anche soltanto un angolo di quel dibattito in un esperimento eseguibile — nel quale un orologio interno ordina o non ordina i dati e un'equazione efficace si adatta o non si adatta — cambia la natura dell'argomentazione. Offre ai teorici un banco sul quale provare i propri strumenti.

Questo è il contributo reale: non una risposta sul tempo, ma un **luogo in cui porre quantitativamente la domanda**. Le piattaforme di atomi freddi hanno già funzionato come analoghi controllabili per la radiazione di Hawking, gli universi in espansione e il decadimento del falso vuoto; questo lavoro aggiunge alla cassetta degli attrezzi il tempo relazionale e la freccia del tempo. Il valore sta negli studi successivi che rende possibili — scelte diverse di orologio, comportamento con rimbalzo rispetto a quello singolare, test di reversibilità — ciascuno trasformato ora in una misura e non soltanto in un calcolo.

In breve

Un fisico ha costruito un condensato di Bose-Einstein, lo ha diviso con una sottile barriera ottica in una metà osservata e una non osservata e ha usato l'entropia che fluisce tra le due per costruire un «tempo entropico» interno. Questo orologio ordina il ciclo di espansione e ricollasso della metà osservata, scorrendo rapidamente quando viene scambiata entropia e fermandosi quando lo scambio cessa; inoltre, un'equazione efficace scritta rispetto a questo tempo interno riproduce i dati misurati nel caso a barriera bassa esaminato dall'autore. L'apparato è un analogo del «problema del tempo» della gravità quantistica canonica: «big bang», «big crunch» e «miniuniverso» sono etichette per un gas confinato matematicamente simile a un modello cosmologico semplificato. È un banco di prova controllato per le idee di tempo relazionale, non una soluzione al problema del tempo, non un'affermazione sull'universo reale e non una prova che il tempo sia «davvero» entropia.

Valutazione critica

Che cosa mostra l'articolo: in un sistema ben isolato di atomi freddi, un orologio interno definito dallo scambio di entropia può ordinare in modo monotono la dinamica osservata e un'equazione efficace nel «tempo entropico» riproduce l'evoluzione misurata nel caso a barriera bassa esaminato.

Che cosa è plausibile ma non mostrato: che il tempo entropico o relazionale sia una buona descrizione del tempo nella vera gravità quantistica. L'esperimento è compatibile con il prendere sul serio queste costruzioni; non le conferma per la natura.

Che cosa non mostra: che il problema del tempo sia risolto; che la gravità quantistica sia risolta; che l'universo sia iniziato con un big bang di questo tipo; che lo spaziotempo emerga dagli atomi; o che «il tempo non esista».

Principali limiti: un'unica piattaforma, un unico autore e una sola scelta di orologio; un'incertezza di circa il 5% per punto; approssimazioni di campo medio e densità mediata; e soprattutto la dipendenza da un'analogia tra un condensato confinato e un modello cosmologico semplificato.

Quanta fiducia dovrebbe avere un lettore non specialista? Fiducia elevata nel fatto che l'esperimento abbia prodotto quanto descritto nel proprio sistema. Fiducia bassa in qualunque salto da questo analogo ad affermazioni sul tempo nell'universo reale.

Fonti

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