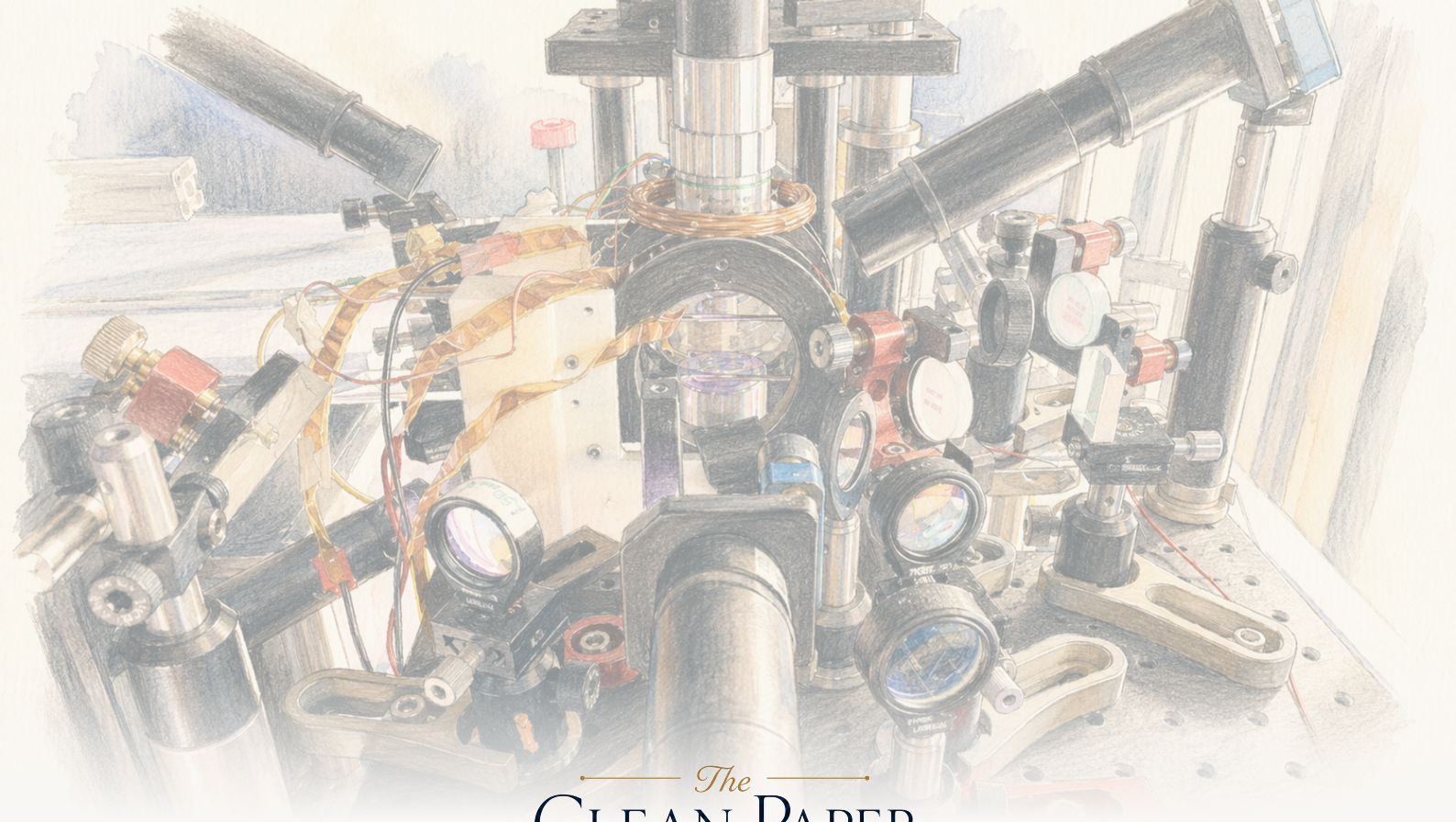

The
CLEAN PAPER

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

Un experiment cu atomi reci testează „problema timpului” din gravitația cuantică — drept analog de laborator, nu răspuns

În gravitația cuantică canonică, ecuația Wheeler–DeWitt nu are un ceas extern care să ordoneze evenimentele: «problema timpului». Un experiment cu un singur autor izolează un condensat Bose–Einstein, îl împarte cu o barieră optică subțire într-un sector neobservat și unul observat și construiește un ceas intern din entropia care curge între ele. Acest «timp entropic» ordonează expansiunea și recollapse-ul sectorului observat, iar o ecuație efectivă reproduce datele măsurate în cazul cu barieră joasă examinat. Este o platformă controlată pentru testarea ideilor despre timpul relațional: «big bang», «big crunch» și «miniunivers» sunt etichete analogice pentru un gaz prins într-o capcană, nu cosmologie reală, iar lucrarea nu pretinde că rezolvă problema timpului sau gravitația cuantică.

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 ceas construit din entropie, în interiorul unei capcane

În gravitația cuantică canonică există o problemă stranie și persistentă: ecuația centrală nu conține timpul. Ecuația Wheeler–DeWitt, cel mai apropiat lucru de o ecuație Schrödinger pentru întregul Univers, spune pur și simplu că un anumit operator care acționează asupra stării dă zero. Nu există un parametru extern care să ticăie, nimic care să ordoneze „înainte” și „după” — și totuși noi trăim în mod evident trecerea timpului. Aceasta este **problema timpului**, iar de peste o jumătate de secol rezistă unei rezolvări.

O lucrare cu un singur autor, publicată în *Physical Review Research*, nu o rezolvă. Face ceva mai discret și, în felul său, mai util: construiește un sistem de laborator mic și bine controlat în care o familie de răspunsuri propuse poate fi **testată pe date reale**. Giovanni Barontini, de la University of Birmingham, ia un condensat Bose–Einstein — un nor de atomi ultrareci care se comportă ca un singur obiect cuantic — și îl transformă într-un analog pe care ideea unui timp „intern”, relațional, poate fi măsurată, nu doar dezbătută. Trucul este să construiască un ceas nu dintr-un cronometru exterior, ci din entropia pe care sistemul o redistribuie în interiorul său.

Distanța dintre „un analog controlat al problemei timpului” și „fizicienii au rezolvat timpul” este întreaga poveste — și este o distanță mare.

Ce a făcut cercetătorul

Aparatul conține un condensat de aproximativ **24.000 de atomi de rubidiu-87**, menținut într-o capcană optică dipolară conservativă și pus în oscilație — întregul nor atomic se mișcă înainte și înapoi prin capcană. O **barieră optică subțire** — cu o lățime de aproximativ 8 micrometri, desenată cu lumină de 675 nm printr-un dispozitiv digital cu micromirrors — împarte capcana în două jumătăți. Una este observată — „**sectorul luminos**” —, iar cealaltă nu — „**sectorul întunecat**”. În fereastra de aproximativ 100 de milisecunde a experimentului, sistemul nu prezintă pierderi măsurabile de particule sau disipare, astfel încât poate fi considerat, cu bună aproximație, un sistem închis, cu un hamiltonian care nu depinde el însuși de timp.

[figure_pair pending]

În stânga, capcana magneto-optică produce norul rece de atomi de rubidiu în interiorul celulei de sticlă: o etapă timpurie de răcire pe drumul spre pregătirea condensatului. În dreapta, Giovanni Barontini se află lângă aparatura optică. Acestea sunt fotografii ale sistemului de laborator din spatele experimentului, nu imagini ale unui Univers miniatural literal.

Privit cu un ceas obișnuit de laborator — câte o imagine de absorbție la fiecare 2 ms — sectorul luminos face ceva sugestiv. Atomii traversează bariera, iar sectorul crește din nimic — moment pe care Barontini îl numește „**big bang**” —, ajunge la o extindere maximă, apoi se contractă și se golește înapoi în partea întunecată — „**big crunch**”. În funcție de înălțimea barierei, ciclul se poate repeta.

Apoi vine ideea centrală. Ceasul laboratorului este *extern* sistemului — exact genul de lucru pe care

cadrul Wheeler–DeWitt nu îl permite. Barontini întreabă, prin urmare: poate fi **ordonată istoria sectorului luminos folosind numai mărimi interne sistemului**? Răspunsul său este un ceas pe care îl numește **timp entropic**, citit direct din aceleași imagini în trei pași simpli. Mai întâi, din fiecare imagine de absorbție extrage patru numere pentru sectorul luminos: numărul de atomi, centrul de masă al profilului densității — care joacă rolul unui „câmp scalar" analog —, lățimea și entropia sectorului, adică entropia per atom obținută printr-o metodă standard, înmulțită cu numărul de atomi. În al doilea rând, pe măsură ce atomii traversează bariera, entropia crește și scade. În al treilea rând, ceasul urmărește gradientul entropiei de-a lungul traseului măsurat al centrului de masă, numărând mărimea fiecărei deplasări, nu direcția ei. Când entropia și centrul de masă cresc sau scad împreună, fiecare pas înaintează ceasul chiar și atunci când norul își inversează mișcarea. În date, aceasta produce aproape peste tot o singură ordonare de la „big bang"-ul sectorului la „big crunch", cu doar câteva mici oscilații acolo unde eșantionarea grosieră face ca cele două schimbări să nu concorde.

În final, autorul derivă o **„ecuație Schrödinger în timpul entropic"** efectivă — o ecuație de evoluție pentru sectorul luminos, scrisă în termenii acestui ceas intern în locul celui extern — și o rezolvă numeric pentru a vedea dacă reproduce ceea ce a înregistrat camera.

Ce a găsit

Trei rezultate, în ordine crescătoare a ambiției.

- **Ceasul intern funcționează ca ordonare.** Timpul entropic crește monoton aproape peste tot, iar viteza lui este stabilită de cât de repede traversează entropia bariera: merge mai repede când entropia este schimbată și **se oprește complet când nu există schimb**. În regimul reversibil, cu barieră joasă, între un big crunch și următorul big bang *nu trece deloc timp intern* — deoarece nu se schimbă entropie — chiar dacă ceasul laboratorului continuă să ticăie. În întregul set de date, entropia totală a celor două sectoare împreună a rămas constantă în limitele barelor de eroare, așa cum trebuie într-un sistem închis.
- **Regimuri diferite produc „timpuri" diferite.** Ridicarea barierei reduce schimbul de entropie, astfel încât ceasul intern merge mai încet. Dacă bariera ajunge suficient de înaltă încât cele două sectoare aproape să nu mai comunice, sectorul luminos se apropie de ceea ce lucrarea numește o „**moarte termică**": o stare staționară în care timpul entropic pur și simplu se oprește.
- **O ecuație efectivă reproduce datele.** Ecuația Schrödinger în timpul entropic, alimentată cu parametrii experimentali, recuperează numeric evoluția măsurată a lățimii norului, lucrarea raportând o concordanță excelentă pentru cazul cu barieră joasă — în care domină termenul condus de entropie; comparația numerică explicită este realizată pentru acest caz.

> **Ce este „problema timpului" și ce este aici „timpul entropic"**
>
> **Problema timpului** este că ecuația principală a gravitației cuantice canonice — Wheeler–DeWitt — nu are o variabilă temporală externă. Un răspuns frecvent este unul *relațional*: o

> mărime fizică din interiorul sistemului este promovată la rolul de „ceas”, iar toate celelalte sunt descrise în raport cu ea. O dificultate recurentă este că alegerile naturale pentru ceas nu sunt întotdeauna monotone — într-un sistem care se recollapsează, ceasul candidat merge înainte și apoi înapoi — astfel încât nu poate eticheta curat o singură direcție de la început la sfârșit.
> **Timpul entropic** este metoda lui Barontini de a evita problema. În loc să citească o variabilă asemănătoare poziției, el construiește ceasul din *entropia* schimbată între sectorul observat și cel neobservat, în așa fel încât să nu se inverseze. Ideea este apropiată ca spirit de ipotezele mai vechi ale „timpului termic”, dar aici este definită operațional dintr-un flux măsurabil de entropie, nu dintr-o structură matematică abstractă — exact ceea ce o face testabilă pe un aparat real.
> Este esențial că termenii cosmologici — „big bang”, „big crunch”, „factor de scară”, „câmp scalar”, „miniunivers” — sunt **etichete analogice**. Ei denumesc trăsături ale unui gaz atomic prins într-o capcană care sunt *structural asemănătoare* ecuațiilor unor modele cosmologice simplificate. Nu sunt afirmații despre Universul real.

Ce nu demonstrează

Aici prudența este cea mai importantă, deoarece vocabularul invită la exagerare.

- **Nu rezolvă problema timpului și nu pretinde că o face.** Încadrarea proprie a lucrării este că „stabilește un cadru experimental controlat în care construcțiile de timp relațional pot fi testate cantitativ”. O platformă de test nu este o teoremă. Întrebarea dacă timpul relațional sau entropic este descrierea *corectă* a timpului în gravitația cuantică rămâne la fel de deschisă ca înainte.
- **Este un analog, nu Universul.** Nu este observată nicio cosmologie. Este observat un condensat Bose–Einstein într-o capcană, iar descrierea sa redusă este *matematic asemănătoare* unui model cosmologic simplificat — „minisuperspace”. Asemănarea este scopul experimentului; este și limita lui. Nimic de aici nu arată că Universul timpuriu a avut un big bang de acest tip, că spațiul-timp este alcătuit din atomi sau că „timpul nu există”.
- **Nu arată că timpul este „în realitate” entropie.** Ceasul entropic este o ordonare construită care funcționează bine în acest sistem. Lucrarea observă înrudirea conceptuală cu ipoteza timpului termic, dar lasă explicit deschis dacă cele două coincid măcar. „Un ceas intern construit din entropie poate ordona acest experiment” este o afirmație mult mai restrânsă decât „timpul este entropie”.
- **Ecuația efectivă este un rezultat de modelare, nu o rescriere a mecanicii cuantice.** Ecuația Schrödinger derivată în timpul entropic se reduce la mecanica cuantică obișnuită atunci când fluxul de entropie este lent și coincide strict cu teoria unitară standard numai când nu curge deloc entropie. Lucrarea o prezintă drept mai generală decât ecuația standard *în situația specifică în care un sistem observat este deschis termodinamic către unul neobservat* — o afirmație despre subsisteme deschise în astfel de montaje, nu despre necesitatea rescrierii fizicii fundamentale.
- **Este un singur experiment, cu un singur autor și o singură alegere a ceasului.** Rezultatele au

aproximativ 5% incertitudine statistică per punct și se bazează pe aproximații de câmp mediu și densitate mediată. Ceasul ales și coarse-graining-ul sunt decizii deliberate de modelare, de genul celor pe care alte grupuri vor dori să le sondeze înainte de concluzii structurale.

Cât de solide sunt dovezile

Pentru afirmația modestă pe care o face efectiv, dovezile sunt curate. Sistemul este cu adevărat bine izolat pe scara de timp relevantă, bilanțul entropiei se închide — entropia totală rămâne constantă în limitele erorilor —, ceasul intern ordonează datele monoton aproape peste tot, iar o ecuație efectivă derivată de autor din același model, cu parametri deduși din date, reproduce dinamica măsurată pentru cazul cu barieră joasă la care a fost aplicată. Datele sunt disponibile public. Este o măsurare reală a unui sistem real și controlabil, nu un experiment mental.

Partea modestă este și greutatea pe care o pot purta rezultatele. Totul se bazează pe analogia dintre modelul redus al condensatului și cosmologia minisuperspace, iar analogiile luminează fără să demonstreze. O singură platformă, de la un singur autor, care arată că o rețetă de timp intern funcționează este o demonstrație de principiu puternică și o bază slabă pentru afirmații despre comportamentul timpului în natură. Interpretarea corectă este: metoda poate fi acum *realizată* în laborator și verificată.

De ce contează

Discuțiile despre problema timpului au rămas mult timp blocate la nivelul formalismului, unde propunerile concurente sunt greu de infirmat deoarece fac puține predicții concrete și măsurabile. Transformarea fie și a unui colț al dezbaterii într-un experiment executabil — în care un ceas intern fie ordonează datele, fie nu, iar o ecuație efectivă fie se potrivește, fie nu — schimbă natura discuției. Le oferă teoreticienilor un banc de lucru pe care își pot testa instrumentele.

Aceasta este contribuția autentică: nu un răspuns despre timp, ci un **loc în care întrebarea poate fi pusă cantitativ**. Platformele cu atomi reci au servit deja drept analoguri controlabile pentru radiația Hawking, Universuri în expansiune și dezintegrarea vidului fals; această lucrare adaugă în trusă timpul relațional și săgeata timpului. Valoarea se află în continuările pe care le face posibile — alte alegeri ale ceasului, comportamente de ricoșeu în comparație cu singularități, teste ale reversibilității —, fiecare devenind acum o măsurătoare, nu doar un calcul.

Pe scurt

Un fizician a construit un condensat Bose–Einstein, l-a împărțit printr-o barieră optică subțire într-o jumătate observată și una neobservată și a folosit entropia care curgea între ele pentru a construi

un „timp entropic” intern. Ceasul ordonează ciclul de expansiune și recollapse al jumătății observate, merge repede când se schimbă entropie și se oprește când nu se schimbă, iar o ecuație efectivă scrisă în acest timp intern reproduce datele măsurate în cazul cu barieră joasă analizat de autor. Montajul este un analog al „problemei timpului” din gravitația cuantică canonică: „big bang”, „big crunch” și „miniunivers” sunt etichete pentru un gaz prins într-o capcană, asemănător matematic unui model cosmologic simplificat. Este o platformă controlată de testare a ideilor despre timpul relațional — nu o soluție a problemei timpului, nu o afirmație despre Universul real și nu o dovadă că timpul este „în realitate” entropie.

Verificare fără exagerări

Ce arată lucrarea: Într-un sistem bine izolat de atomi reci, un ceas intern definit prin schimbul de entropie poate ordona monoton dinamica observată, iar o ecuație efectivă în „timp entropic” reproduce evoluția măsurată în cazul cu barieră joasă analizat.

Ce este plauzibil, dar nedemonstrat: Că timpul entropic sau relațional este o descriere bună a timpului în gravitația cuantică reală. Experimentul este compatibil cu tratarea serioasă a acestor construcții; nu le confirmă pentru natură.

Ce nu arată: Că problema timpului este rezolvată; că gravitația cuantică a fost rezolvată; că Universul a început printr-un big bang de acest tip; că spațiul-timp emerge din atomi; sau că „timpul nu există”.

Limitări principale: O singură platformă, un singur autor și o singură alegere a ceasului; aproximativ 5% incertitudine per punct; aproximații de câmp mediu și densitate mediată; și, mai presus de toate, dependența de analogia dintre un condensat prins într-o capcană și un model cosmologic simplificat.

Câtă încredere ar trebui să aibă un cititor obișnuit? Încredere mare că experimentul a făcut ceea ce raportează în propriul sistem. Încredere scăzută în orice salt de la acest analog la afirmații despre timp în Universul real.

Surse

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