The Clean Paper

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

Eksperiment s hladnim atomima testira 'problem vremena' kvantne gravitacije — kao laboratorijsku analogiju, a ne odgovor

U kanonskoj kvantnoj gravitaciji Wheeler-DeWittova jednačina nema spoljašnji sat koji bi poredavao događaje: to je 'problem vremena'. Rad jednog autora izoluje Bose-Einsteinov kondenzat, deli ga tankom optičkom barijerom na neposmatrani i posmatrani sektor te gradi unutrašnji sat iz entropije koja među njima teče. To 'entropijsko vreme' uređuje širenje i ponovo sažimanje posmatranog sektora, a efektivna jednačina reprodukuje izmerene podatke u ispitanom slučaju niske barijere. To je kontrolisano ispitno okruženje za ideje relacijskog vremena: 'veliki prasak', 'veliko sažimanje' i 'mini-svemir' analogne su oznake za zarobljeni gas, a ne stvarna kozmologija, i rad ne tvrdi da rešava problem vremena ili kvantnu gravitaciju.

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

Sat izgrađen od entropije, unutar zamke

U kanonskoj kvantnoj gravitaciji postoji neobičan i tvrdokoran problem: centralna jednačina u sebi nema vreme. Wheeler-DeWittova jednačina, najbliže što imamo Schrödingerovoj jednačini za ceo svemir, jednostavno kaže da određeni operator primenjen na stanje daje nulu. Nema spoljašnjeg parametra koji otkucava, ničega što bi poredalo „pre” i „posle” — a ipak sasvim jasno doživljavamo protjecanje vremena. To je **problem vremena** i više od pola veka nije razrešen.

Rad jednog autora u časopisu *Physical Review Research* ne rešava ga. Radi nešto tiše i na svoj način korisnije: gradi mali, dobro kontrolisan laboratorijski sistem u kojem se jedna grupa predloženih odgovora može **testirati na stvarnim podacima**. Giovanni Barontini sa Univerziteta u Birminghamu uzima Bose-Einsteinov kondenzat — oblak ultrahladnih atoma koji se ponaša kao jedan kvantni objekt — i pretvara ga u analog na kojem se ideja „unutrašnjeg”, relacijskog vremena može meriti, a ne samo raspravljati. Trik je izgraditi sat ne iz spoljašnje štoperice, nego iz entropije koju sistem premešta unutar sebe.

Udaljenost između „kontrolisanog analoga problema vremena” i „fizičari su rešili vreme” cela je priča ovde, a ta je udaljenost velika.

Šta je istraživač napravio

Uređaj sadrži kondenzat od oko **24.000 atoma rubidija-87** zadržanih u konzervativnoj optičkoj dipolnoj zamci i podstaknutih na osciliranje — ceo oblak atoma pomera se napred-nazad kroz zamku. **Tanka optička barijera** — široka oko 8 mikrometara, iscrtana svetlošću valne dužine 675 nm pomoću digitalnog mikrozrcalnog uređaja — deli zamku na dve polovice. Jedna se polovica posmatra („**svetli sektor**”), druga ne („**tamni sektor**”). Tokom približno 100 milisekundi eksperimenta sistem ne pokazuje merljiv gubitak čestica ni disipaciju, pa je s dobrom aproksimacijom zatvoren sistem s Hamiltonijanom koji sam po sebi ne zavisi o vremenu.

[figure_pair pending]

Levo, magneto-optička zamka proizvodi hladni oblak atoma rubidija unutar staklene ćelije: rana faza hlađenja na putu do pripreme kondenzata. Desno, Giovanni Barontini stoji uz optički uređaj. To su fotografije laboratorijskog sistema iza eksperimenta, a ne slike doslovnog minijaturnog svemira.

Gledan običnim laboratorijskim satom — apsorpcijska slika svake 2 ms — svetli sektor čini nešto sugestivno. Atomi prelaze barijeru i sektor raste iz ničega (Barontini taj trenutak naziva „**velikim praskom**”), dostiže najveći opseg, zatim se skuplja i prazni nazad u tamnu stranu („**veliko sažimanje**”). Zavisno o visini barijere, to se može ciklički ponavljati.

Tada dolazi stvarna poenta. Laboratorijski sat je *spoljašnji* sistemu — upravo ono što Wheeler-DeWittov okvir ne dozvoljava. Zato Barontini pita: može li se istorija svetlog sektora **poredati samo veličinama koje su unutrašnje sistemu**? Njegov odgovor je sat koji naziva **entropijskim vremenom**, očitan direktno iz istih slika u tri jednostavna koraka. Prvo iz svake apsorpcijske slike izvlači četiri

broja za svetli sektor: broj atoma, centar mase profila gustine (koje ima ulogu analognog „skalarnog polja”), širinu i entropiju — entropiju po atomu, dobijenu standardnom metodom, pomnoženu s brojem atoma. Drugo, kako atomi prelaze barijeru, ta entropija raste i pada. Treće, sat prati gradijent entropije duž izmerenog puta centra mase, brojeći veličinu svakog pomaka, a ne njegov smer. Kada entropija i centar mase rastu ili padaju zajedno, svaki korak pomera sat napred čak i kada oblak promeni smer. U podacima to gotovo svugde daje jedno uređeno vreme od „velikog praska” sektora do njegova „velikog sažimanja”, uz tek nekoliko malih kolebanja gde grubo uzorkovanje uzrokuje neslaganje tih dveju promena.

Na kraju izvodi efektivnu **„Schrödingerovu jednačinu u entropijskom vremenu”** — evolucijsku jednačinu za svetli sektor zapisanu u odnosu na taj unutrašnji sat umesto spoljašnjeg — i numerički je rešava kako bi proverio reprodukuje li ono što je kamera stvarno zabeležila.

Šta je pronađeno

Tri rezultata, od manje prema većoj ambiciji.

- **Unutrašnji sat radi kao poredak.** Entropijsko vreme gotovo svugde monotono raste, a brzinu mu određuje koliko brzo entropija prelazi barijeru: teče brže kada se entropija razmenjuje i **potpuno staje kada razmene nema**. U reverzibilnom režimu niske barijere *nikakvo unutrašnje vreme ne prolazi* između velikog sažimanja i sledećeg velikog praska — jer tada nema razmene entropije — iako laboratorijski sat nastavlja otkucavati. U celom skupu podataka ukupna entropija oba sektora zajedno ostala je konstantna unutar granica greške, kako zatvoreni sistem zahteva.
- **Različiti režimi daju različita „vremena”.** Povisite barijeru i razmena entropije se smanji, pa unutrašnji sat teče sporije. Povisite je do tačke na kojoj dva sektora jedva komuniciraju i svetli sektor se približava onome što rad naziva „**toplotnom smrću**”: stacionarnom stanju u kojem entropijsko vreme jednostavno stane.
- **Efektivna jednačina reprodukuje podatke.** Schrödingerova jednačina u entropijskom vremenu, kojoj se daju eksperimentalni parametri, numerički reprodukuje izmerenu evoluciju širine oblaka; rad izveštava o izvrsnom slaganju za slučaj niske barijere (u kojem dominira član pogonjen entropijom), a eksplicitna brojčana poređenje provedena je upravo za taj slučaj.

> **What su „problem vremena” i „entropijsko vreme” ovde**
>
> **Problem vremena** je činjenica da glavna jednačina kanonske kvantne gravitacije (Wheeler-DeWittova) nema spoljašnju vremensku varijablu. Čest odgovor je *relacijski*: jednu fizičku veličinu unutar sistema proglasiti „satom” i sve ostalo opisivati u odnosu na nju. Ponavljajući je problem to što prirodni izbori sata nisu uvek monotoni — u sistemu koji se ponovo sažima kandidat za sat ide napred pa nazad — pa ne može čisto označiti jedan smer od početka do kraja.
> **Entropijsko vreme** Barontinijev je način zaobilaženja toga. Umesto očitavanja položajne varijable, sat gradi iz *entropije* koja se razmenjuje između posmatranog i neposmatranog

> sektora, konstruisane tako da ne ide unazad. Po duhu je blisko starijim idejama „toplotnog vremena", ali ovde je operativno definisano iz merljivog toka entropije, a ne iz apstraktne matematičke strukture — upravo zato ga je moguće testirati na stvarnom uređaju.
> Ključno, kozmološke reči — „veliki prasak", „veliko sažimanje", „faktor skale", „skalarno polje", „mini-svemir" — **analogne su oznake**. Imenuju svojstva zarobljenog gasa atoma koja su *strukturno slična* jednačinama pojednostavljenih kozmoloških modela. Nisu tvrdnje o stvarnom svemiru.

Šta ovo ne dokazuje

Ovde je oprez najvažniji jer rečnik lako poziva na pretjerivanje.

- **Ne rešava problem vremena i ne tvrdi da ga rešava.** Sopstveni okvir rada kaže da „uspostavlja kontrolisano eksperimentalno okruženje u kojem se konstrukcije relacijskog vremena mogu kvantitativno testirati". Testna platforma nije teorem. Je li relacijsko ili entropijsko vreme *pravi* opis vremena u kvantnoj gravitaciji ostaje jednako otvoreno kao pre.
- **To je analog, a ne svemir.** Ne posmatra se kozmologija. Posmatra se Bose-Einsteinov kondenzat u zamci, a njegov reducirani opis *matematički je sličan* pojednostavljenom („minisuperspace") kozmološkom modelu. Ta je sličnost smisao eksperimenta; ujedno je i njegova granica. Ništa ovde ne pokazuje da je rani svemir imao ovakav veliki prasak, da je prostor-vreme sastavljeno od atoma ili da „vreme ne postoji".
- **Ne pokazuje da je vreme 'zapravo' entropija.** Entropijski sat jedan je konstruisani poredak koji dobro radi u ovom sistemu. Rad beleži konceptualnu srodnost s hipotezom toplotnog vremena, ali izričito ostavlja otvoreno poklapaju li se uopšte te dve ideje. „Unutrašnji sat izgrađen od entropije može urediti ovaj eksperiment" mnogo je uža tvrdnja od „vreme je entropija".
- **Efektivna jednačina rezultat je modeliranja, a ne prepisivanje kvantne mehanike.** Izvedena Schrödingerova jednačina u entropijskom vremenu svodi se na običnu kvantnu mehaniku kada je tok entropije spor, a strogo je uobičajena unitarna teorija samo kada entropija uopšte ne teče. Rad je predstavlja kao opštiju od standardne jednačine *upravo kada je posmatrani sistem termodinamički otvoren prema neposmatranom* — tvrdnja o otvorenim podsistemima u ovakvoj postavi, a ne tvrdnja da se osnovna fizika mora prepisati na taj način.
- **Jedan eksperiment, jedan autor, jedan izbor sata.** Rezultati imaju približno 5% statističke nesigurnosti po tački i oslanjaju se na aproksimacije srednjeg polja i prosečne gustine. Izabrani sat i coarse-graining namerne su odluke modeliranja koje će druge grupe htjeti ispitati pre izvođenja strukturnih zaključaka.

Koliko su jaki dokazi

Za skromnu tvrdnju koju rad zaista iznosi dokazi su čisti. Sistem je zaista dobro izolovan na relevantnoj vremenskoj skali, bilanca entropije se zatvara (ukupna entropija konstantna je unutar greške), unutrašnji sat gotovo svugde monotono uređuje podatke, a efektivna jednačina, koju je autor izveo iz istog modela s parametrima dobijenima iz podataka, reprodukuje izmerenu dinamiku u slučaju niske barijere na koji je primenjena. Podaci su javno dostupni. To je stvarno merenje stvarnog, upravljivog sistema, a ne misaoni eksperiment.

Teret koji može nositi srazmerno je skroman. Sve počiva na analogiji između reduciranog modela kondenzata i minisuperspace kozmologije, a analogije osvetljavaju bez dokazivanja. Jedna platforma jednog autora koja pokazuje da jedan recept za unutrašnje vreme radi snažan je dokaz načela i slaba osnova za tvrdnje o ponašanju vremena u prirodi. Ispravno čitanje glasi: metoda je sada nešto što možete *napraviti* u laboratoriji i proveriti.

Zašto je važno

Rasprave o problemu vremena dugo su bile zaglavljene na nivou formalizma, gde je konkurentske predloge teško opovrgnuti jer daju malo konkretnih, merljivih predviđanja. Pretvaranje makar jednog ugla te rasprave u eksperiment koji se može provesti — gde unutrašnji sat ili uređuje podatke ili ne, gde efektivna jednačina ili odgovara ili ne — menja karakter rasprave. Teoretičarima daje laboratorijsku klupu na kojoj mogu iskušati svoje alate.

To je stvarni doprinos: ne odgovor o vremenu, nego **mesto na kojem se pitanje može postaviti kvantitativno**. Platforme hladnih atoma već su služile kao kontrolisani analozi Hawkingova zračenja, svemira koji se šire i raspada lažnog vakuuma; ovo u tu kutiju alata dodaje relacijsko vreme i strelicu vremena. Vrednost je u naknadnim eksperimentima koje omogućava — drugačiji izbori sata, odbijanje nasuprot singularnom ponašanju, testovi reverzibilnosti — sada kao merenja, a ne samo izračuni.

Kratak rezime

Fizičar je izgradio Bose-Einsteinov kondenzat, podelio ga tankom optičkom barijerom na posmatranu i neposmatranu polovicu te iz entropije koja teče između njih konstruisao unutrašnje „entropijsko vreme". Taj sat uređuje ciklus širenja i ponovnog sažimanja posmatrane polovice, teče brzo kada se entropija razmenjuje i staje kada razmene nema, a efektivna jednačina zapisana u tom unutrašnjem vremenu reprodukuje izmerene podatke u slučaju niske barijere koji je autor ispitao. Postava je analog „problema vremena" iz kanonske kvantne gravitacije: „veliki prasak", „veliko sažimanje" i „mini-svemir" oznake su za zarobljeni gas matematički sličan pojednostavljenom kozmološkom modelu. To je kontrolisana testna platforma za ideje relacijskog vremena — ne rešenje problema vremena, ne tvrdnja o stvarnom svemiru i ne dokaz da je vreme „zapravo" entropija.

Provera bez ulepšavanja

Šta rad pokazuje: U jednom dobro izoliranom sistemu hladnih atoma unutrašnji sat definisan razmenom entropije može monotono urediti posmatranu dinamiku, a efektivna jednačina „entropijskog vremena” reprodukuje izmerenu evoluciju u ispitanom slučaju niske barijere.

Šta je verovatno, ali nije pokazano: Da je entropijsko ili relacijsko vreme dobar opis vremena u stvarnoj kvantnoj gravitaciji. Eksperiment je u skladu sa ozbiljnim razmatranjem takvih konstrukcija; ne potvrđuje ih za prirodu.

Šta rad ne pokazuje: Da je problem vremena rešen; da je kvantna gravitacija rešena; da je svemir počeo velikim praskom ove vrste; da prostor-vreme izranja iz atoma; ili da „vreme ne postoji”.

Glavna ograničenja: Jedna platforma, jedan autor i jedan izbor sata; približno 5% nesigurnosti po tački; aproksimacije srednjeg polja i prosečne gustine; te iznad svega oslanjanje na analogiju između zarobljenog kondenzata i pojednostavljenog kozmološkog modela.

Koliko poverenja treba da ima prosečan čitalac? Visoko da je eksperiment na sopstvenom sistemu učinio ono što rad navodi. Nisko za svaki skok s tog analoga na tvrdnje o vremenu u stvarnom svemiru.

Izvori

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