The Clean Paper

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

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

U kanonskoj kvantnoj gravitaciji Wheeler-DeWittova jednadžba nema vanjski sat koji bi poredavao događaje: to je 'problem vremena'. Rad jednog autora izolira Bose-Einsteinov kondenzat, dijeli ga tankom optičkom barijerom na nepromatrani i promatrani sektor te gradi unutarnji sat iz entropije koja među njima teče. To 'entropijsko vrijeme' uređuje širenje i ponovno sažimanje promatranog sektora, a efektivna jednadžba reproducira izmjerene podatke u ispitanom slučaju niske barijere. To je kontrolirano ispitno okruženje za ideje relacijskog vremena: 'veliki prasak', 'veliko sažimanje' i 'mini-svemir' analogne su oznake za zarobljeni plin, a ne stvarna kozmologija, i rad ne tvrdi da rješava 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: središnja jednadžba u sebi nema vrijeme. Wheeler-DeWittova jednadžba, najbliže što imamo Schrödingerovoj jednadžbi za cijeli svemir, jednostavno kaže da određeni operator primijenjen na stanje daje nulu. Nema vanjskog parametra koji otkucava, ničega što bi poredalo „prije" i „poslije" — a ipak sasvim jasno doživljavamo protjecanje vremena. To je **problem vremena** i više od pola stoljeća nije razriješen.

Rad jednog autora u časopisu *Physical Review Research* ne rješava ga. Radi nešto tiše i na svoj način korisnije: gradi mali, dobro kontroliran laboratorijski sustav u kojem se jedna skupina predloženih odgovora može **testirati na stvarnim podacima**. Giovanni Barontini sa Sveučilišta 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 „unutarnjeg", relacijskog vremena može mjeriti, a ne samo raspravljati. Trik je izgraditi sat ne iz vanjske štoperice, nego iz entropije koju sustav premješta unutar sebe.

Udaljenost između „kontroliranog analoga problema vremena" i „fizičari su riješili vrijeme" cijela je priča ovdje, a ta je udaljenost velika.

Što je istraživač napravio

Uređaj sadrži kondenzat od oko **24.000 atoma rubidija-87** zadržanih u konzervativnoj optičkoj dipolnoj zamci i potaknutih na osciliranje — cijeli oblak atoma pomiče se naprijed-natrag kroz zamku. **Tanka optička barijera** — široka oko 8 mikrometara, iscrtana svjetlošću valne duljine 675 nm pomoću digitalnog mikrozrcalnog uređaja — dijeli zamku na dvije polovice. Jedna se polovica promatra („**svijetli sektor**"), druga ne („**tamni sektor**"). Tijekom približno 100 milisekundi pokusa sustav ne pokazuje mjerljiv gubitak čestica ni disipaciju, pa je s dobrom aproksimacijom zatvoren sustav s Hamiltonijanom koji sam po sebi ne ovisi o vremenu.

[figure_pair pending]

Lijevo, 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 sustava iza pokusa, a ne slike doslovnog minijaturnog svemira.

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

Tada dolazi stvarna poanta. Laboratorijski sat je *izvanjski* sustavu — upravo ono što Wheeler-DeWittov okvir ne dopušta. Zato Barontini pita: može li se povijest svijetlog sektora **poredati samo veličinama koje su unutarnje sustavu**? Njegov odgovor je sat koji naziva **entropijskim vremenom**, očitan izravno iz istih slika u tri jednostavna koraka. Prvo iz svake apsorpcijske slike izvlači četiri broja

za svijetli sektor: broj atoma, središte mase profila gustoće (koje ima ulogu analognog „skalarnog polja”), širinu i entropiju — entropiju po atomu, dobivenu standardnom metodom, pomnoženu s brojem atoma. Drugo, kako atomi prelaze barijeru, ta entropija raste i pada. Treće, sat prati gradijent entropije duž izmjerenog puta središta mase, brojeći veličinu svakog pomaka, a ne njegov smjer. Kada entropija i središte mase rastu ili padaju zajedno, svaki korak pomiče sat naprijed čak i kada oblak promijeni smjer. U podacima to gotovo svugdje daje jedno uređeno vrijeme od „velikog praska” sektora do njegova „velikog sažimanja”, uz tek nekoliko malih kolebanja gdje grubo uzorkovanje uzrokuje neslaganje tih dviju promjena.

Na kraju izvodi efektivnu **„Schrödingerovu jednadžbu u entropijskom vremenu”** — evolucijsku jednadžbu za svijetli sektor zapisanu u odnosu na taj unutarnji sat umjesto vanjskog — i numerički je rješava kako bi provjerio reproducira li ono što je kamera stvarno zabilježila.

Što je pronađeno

Tri rezultata, od manje prema većoj ambiciji.

- **Unutarnji sat radi kao poredak.** Entropijsko vrijeme gotovo svugdje monotono raste, a brzinu mu određuje koliko brzo entropija prelazi barijeru: teče brže kada se entropija razmjenjuje i **potpuno staje kada razmjene nema**. U reverzibilnom režimu niske barijere *nikakvo unutarnje vrijeme ne prolazi* između velikog sažimanja i sljedećeg velikog praska — jer tada nema razmjene entropije — iako laboratorijski sat nastavlja otkucavati. U cijelom skupu podataka ukupna entropija obaju sektora zajedno ostala je konstantna unutar granica pogreške, kako zatvoreni sustav zahtijeva.
- **Različiti režimi daju različita „vremena”.** Povisite barijeru i razmjena entropije se smanji, pa unutarnji sat teče sporije. Povisite je do točke na kojoj dva sektora jedva komuniciraju i svijetli sektor se približava onome što rad naziva „**toplinskom smrću**”: stacionarnom stanju u kojem entropijsko vrijeme jednostavno stane.
- **Efektivna jednadžba reproducira podatke.** Schrödingerova jednadžba u entropijskom vremenu, kojoj se daju eksperimentalni parametri, numerički reproducira izmjerenu evoluciju širine oblaka; rad izvještava o izvrsnom slaganju za slučaj niske barijere (u kojem dominira član pogonjen entropijom), a eksplicitna brojčana usporedba provedena je upravo za taj slučaj.

> **Što su „problem vremena” i „entropijsko vrijeme” ovdje**
>
> **Problem vremena** jest činjenica da glavna jednadžba kanonske kvantne gravitacije (Wheeler-DeWittova) nema vanjsku vremensku varijablu. Čest odgovor je *relacijski*: jednu fizičku veličinu unutar sustava proglasiti „satom” i sve ostalo opisivati u odnosu na nju. Ponavljajući je problem to što prirodni izbori sata nisu uvijek monotoni — u sustavu koji se ponovno sažima kandidat za sat ide naprijed pa natrag — pa ne može čisto označiti jedan smjer od početka do kraja.
> **Entropijsko vrijeme** Barontinijev je način zaobilaženja toga. Umjesto očitavanja položajne varijable, sat gradi iz *entropije* koja se razmjenjuje između promatranog i nepromatranog sektora, konstruirane tako da ne ide unatrag. Po duhu je blisko starijim idejama „toplinskog

> vremena", ali ovdje je operativno definirano iz mjerljivog toka entropije, a ne iz apstraktne matematičke strukture — upravo zato ga je moguće testirati na stvarnom uređaju.
> Ključno, kozmološke riječi — „veliki prasak", „veliko sažimanje", „faktor skale", „skalarno polje", „mini-svemir" — **analogne su oznake**. Imenuju svojstva zarobljenog plina atoma koja su *strukturno slična* jednadžbama pojednostavljenih kozmoloških modela. Nisu tvrdnje o stvarnom svemiru.

Što ovo ne dokazuje

Ovdje je oprez najvažniji jer rječnik lako poziva na pretjerivanje.

- **Ne rješava problem vremena i ne tvrdi da ga rješava.** Vlastiti okvir rada kaže da „uspostavlja kontrolirano eksperimentalno okruženje u kojem se konstrukcije relacijskog vremena mogu kvantitativno testirati". Testna platforma nije teorem. Je li relacijsko ili entropijsko vrijeme *pravi* opis vremena u kvantnoj gravitaciji ostaje jednako otvoreno kao prije.
- **To je analog, a ne svemir.** Ne promatra se kozmologija. Promatra se Bose-Einsteinov kondenzat u zamci, a njegov reducirani opis *matematički je sličan* pojednostavljenom („minisuperspace") kozmološkom modelu. Ta je sličnost smisao pokusa; ujedno je i njegova granica. Ništa ovdje ne pokazuje da je rani svemir imao ovakav veliki prasak, da je prostor-vrijeme sastavljeno od atoma ili da „vrijeme ne postoji".
- **Ne pokazuje da je vrijeme 'zapravo' entropija.** Entropijski sat jedan je konstruirani poredak koji dobro radi u ovom sustavu. Rad bilježi konceptualnu srodnost s hipotezom toplinskog vremena, ali izričito ostavlja otvoreno poklapaju li se uopće te dvije ideje. „Unutarnji sat izgrađen od entropije može urediti ovaj pokus" mnogo je uža tvrdnja od „vrijeme je entropija".
- **Efektivna jednadžba rezultat je modeliranja, a ne prepisivanje kvantne mehanike.** Izvedena Schrödingerova jednadžba u entropijskom vremenu svodi se na običnu kvantnu mehaniku kada je tok entropije spor, a strogo je uobičajena unitarna teorija samo kada entropija uopće ne teče. Rad je predstavlja kao općenitiju od standardne jednadžbe *upravo kada je promatrani sustav termodinamički otvoren prema nepromatranom* — tvrdnja o otvorenim podsustavima u ovakvoj postavi, a ne tvrdnja da se temeljna fizika mora prepisati na taj način.
- **Jedan pokus, jedan autor, jedan izbor sata.** Rezultati imaju približno 5% statističke nesigurnosti po točki i oslanjaju se na aproksimacije srednjeg polja i prosječne gustoće. Odabrani sat i coarse-graining namjerne su odluke modeliranja koje će druge skupine htjeti ispitati prije izvođenja strukturnih zaključaka.

Koliko su jaki dokazi

Za skromnu tvrdnju koju rad doista iznosi dokazi su čisti. Sustav je zaista dobro izoliran na relevantnoj vremenskoj skali, bilanca entropije se zatvara (ukupna entropija konstantna je unutar pogreške),

unutarnji sat gotovo svugdje monotono uređuje podatke, a efektivna jednadžba, koju je autor izveo iz istog modela s parametrima dobivenima iz podataka, reproducira izmjerenu dinamiku u slučaju niske barijere na koji je primijenjena. Podaci su javno dostupni. To je stvarno mjerenje stvarnog, upravljivog sustava, a ne misaoni pokus.

Teret koji može nositi razmjerno je skroman. Sve počiva na analogiji između reduciranog modela kondenzata i minisuperspace kozmologije, a analogije osvjetljavaju bez dokazivanja. Jedna platforma jednog autora koja pokazuje da jedan recept za unutarnje vrijeme 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 laboratoriju i provjeriti.

Zašto je važno

Rasprave o problemu vremena dugo su bile zaglavljene na razini formalizma, gdje je konkurentske prijedloge teško opovrgnuti jer daju malo konkretnih, mjerljivih predviđanja. Pretvaranje makar jednog kuta te rasprave u pokus koji se može provesti — gdje unutarnji sat ili uređuje podatke ili ne, gdje efektivna jednadžba ili odgovara ili ne — mijenja karakter rasprave. Teoretičarima daje laboratorijsku klupu na kojoj mogu iskušati svoje alate.

To je stvarni doprinos: ne odgovor o vremenu, nego **mjesto na kojem se pitanje može postaviti kvantitativno**. Platforme hladnih atoma već su služile kao kontrolirani analozi Hawkingova zračenja, svemira koji se šire i raspada lažnog vakuuma; ovo u tu kutiju alata dodaje relacijsko vrijeme i strelicu vremena. Vrijednost je u naknadnim pokusima koje omogućuje — drukčiji izbori sata, odbijanje nasuprot singularnom ponašanju, testovi reverzibilnosti — sada kao mjerenja, a ne samo izračuni.

Sažetak bez uljepšavanja

Fizičar je izgradio Bose-Einsteinov kondenzat, podijelio ga tankom optičkom barijerom na promatranu i nepromatranu polovicu te iz entropije koja teče između njih konstruirao unutarnje „entropijsko vrijeme". Taj sat uređuje ciklus širenja i ponovnog sažimanja promatrane polovice, teče brzo kada se entropija razmjenjuje i staje kada razmjene nema, a efektivna jednadžba zapisana u tom unutarnjem vremenu reproducira izmjerene 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 plin matematički sličan pojednostavljenom kozmološkom modelu. To je kontrolirana testna platforma za ideje relacijskog vremena — ne rješenje problema vremena, ne tvrdnja o stvarnom svemiru i ne dokaz da je vrijeme „zapravo" entropija.

Provjera bez okolišanja

Što rad pokazuje: U jednom dobro izoliranom sustavu hladnih atoma unutarnji sat definiran razmjenom entropije može monotono urediti promatranu dinamiku, a efektivna jednadžba „entropijskog vremena” reproducira izmjerenu evoluciju u ispitanom slučaju niske barijere.

Što je plausibilno, ali nije pokazano: Da je entropijsko ili relacijsko vrijeme dobar opis vremena u stvarnoj kvantnoj gravitaciji. Pokus je u skladu s ozbiljnim razmatranjem takvih konstrukcija; ne potvrđuje ih za prirodu.

Što rad ne pokazuje: Da je problem vremena riješen; da je kvantna gravitacija riješena; da je svemir počeo velikim praskom ove vrste; da prostor-vrijeme izranja iz atoma; ili da „vrijeme ne postoji”.

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

Koliko povjerenja treba imati opći čitatelj? Visoko da je pokus na vlastitom sustavu 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