The Clean Paper

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

Experiment s ultrachladnými atómami skúša „problém času“ v kvantovej gravitácii — ako laboratórnu analógiu, nie ako odpoveď

V kanonickej kvantovej gravitácii nemá Wheelerova-DeWittova rovnica vonkajšie hodiny, ktoré by zoradili udalosti: ide o „problém času“. Experiment jediného autora izoluje Boseho-Einsteinov kondenzát, rozdelí ho tenkou optickou bariérou na nepozorovaný a pozorovaný sektor a vytvorí vnútorné hodiny z entropie, ktorá medzi nimi prúdi. Tento „entropický čas“ usporiada rozpínanie a opätovné zmršťovanie pozorovaného sektora a efektívna rovnica reprodukuje namerané údaje v skúmanom prípade nízkej bariéry. Ide o kontrolované skúšobné prostredie pre predstavy relačného času: „veľký tresk“, „veľký krach“ a „minivesmír“ sú analogické názvy pre zachytený plyn, nie skutočná kozmológia, a práca netvrdí, že rieši problém času alebo kvantovú gravitáciu.

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

Hodiny vytvorené z entropie vo vnútri pasce

V kanonickej kvantovej gravitácii sa skrýva zvláštny a odolný problém: v jej ústrednej rovnici sa vôbec nenachádza čas. Wheelerova-DeWittova rovnica, najbližšia obdoba Schrödingerovej rovnice pre celý vesmír, jednoducho hovorí, že pôsobenie určitého operátora na stav dáva nulu. Nie je v nej žiadny vonkajší parameter, ktorý by tikal, nič, čo by zoradilo „predtým" a „potom" — a predsa očividne prežívame plynutie času. Toto je **problém času**, ktorý sa nepodarilo vyriešiť už viac než pol storočia.

Článok jediného autora v časopise *Physical Review Research* ho nerieši. Robí niečo nenápadnejšie a svojím spôsobom užitočnejšie: vytvára malý, dobre kontrolovaný laboratórny systém, v ktorom možno jednu skupinu navrhovaných odpovedí **porovnať so skutočnými dátami**. Giovanni Barontini z University of Birmingham vezme Boseho-Einsteinov kondenzát — oblak ultrachladných atómov správajúci sa ako jediný kvantový objekt — a premení ho na analógiu, na ktorej sa dá predstava „vnútorného", relačného času merať, nielen o nej diskutovať. Trik spočíva v tom, že hodiny nevytvorí z vonkajších stopiek, ale z entropie, ktorú systém presúva vo svojom vlastnom vnútri.

Vzdialenosť medzi „kontrolovanou analógiou problému času" a tvrdením „fyzici vyriešili čas" je celým príbehom tejto práce — a je to veľká vzdialenosť.

Čo výskumník urobil

Zariadenie tvorí kondenzát približne **24 000 atómov rubídia-87**, zachytený v konzervatívnej optickej dipólovej pasci a uvedený do kmitania — celý oblak atómov sa prelieva tam a späť naprieč pascou. **Tenká optická bariéra**, široká približne 8 mikrometrov a vytvorená svetlom s vlnovou dĺžkou 675 nm pomocou digitálneho mikrozrkadlového zariadenia, rozdeľuje pascu na dve polovice. Jedna polovica sa sleduje („**svetlý sektor**"), druhá nie („**tmavý sektor**"). Počas približne 100 milisekúnd trvajúceho experimentu systém nevykazuje merateľnú stratu častíc ani disipáciu, takže je s dobrou presnosťou uzavretým systémom s Hamiltoniánom, ktorý sám od času nezávisí.

[figure_pair pending]

Vľavo magneto-optická pasca vytvára vo vnútri sklenenej cely chladný oblak atómov rubídia: ide o skorú fázu chladenia na ceste k príprave kondenzátu. Vpravo stojí Giovanni Barontini pri optickej aparatúre. Sú to fotografie laboratórneho systému použitého v experimente, nie snímky doslovného miniatúrneho vesmíru.

Pri sledovaní bežnými laboratórnymi hodinami — absorpčným snímkom každé 2 ms — robí svetlý sektor niečo, čo pripomína kozmologický dej. Atómy pretekajú cez bariéru a sektor vyrastie z ničoho (Barontini tento okamih označuje ako „**veľký tresk**"), dosiahne maximálny rozsah, potom sa zmrští a vyprázdni späť do tmavej polovice („**veľký krach**"). V závislosti od výšky bariéry sa tento cyklus môže opakovať.

Potom prichádza skutočná podstata experimentu. Laboratórne hodiny sú voči systému *vonkajšie* — presne taký druh časového parametra, ktorý Wheelerova-DeWittova rovnica nepripúšťa. Barontini sa preto pýta: možno históriu svetlého sektora **usporiadať výlučne pomocou veličín vo vnútri systému**?

Jeho odpoveďou sú hodiny, ktoré nazýva **entropický čas** a ktoré sa čítajú priamo z tých istých snímok v troch jednoduchých krokoch. Najprv z každého absorpčného snímku získa pre svetlý sektor štyri čísla: počet atómov, ťažisko hustotného profilu — ktoré plní úlohu analogického „skalárneho poľa“ — jeho šírku a entropiu, teda entropiu na atóm získanú štandardnou metódou vynásobenú počtom atómov. Po druhé, keď atómy prechádzajú cez bariéru, táto entropia rastie a klesá. Po tretie, hodiny sledujú gradient entropie pozdĺž nameranej dráhy ťažiska a započítavajú veľkosť každého posunu bez ohľadu na jeho smer. Keď entropia a ťažisko rastú alebo klesajú spolu, každý krok posunie hodiny dopredu aj vtedy, keď sa pohyb oblaku obráti. V dátach tak vznikne takmer všade jediné poradie od „veľkého tresku“ sektora po jeho „veľký krach“, iba s niekoľkými malými výkyvmi tam, kde hrubšie časové vzorkovanie spôsobí nesúlad medzi oboma zmenami.

Napokon odvodí efektívnu **„Schrödingerovu rovnicu v entropickom čase“** — evolučnú rovnicu svetlého sektora zapísanú pomocou týchto vnútorných hodín namiesto vonkajších — a numericky ju vyrieši, aby zistil, či reprodukuje to, čo kamera skutočne zaznamenala.

Čo zistil

Tri výsledky, zoradené podľa rastúcej ambicióznosti.

- **Vnútorné hodiny fungujú ako usporiadanie.** Entropický čas rastie takmer všade monotónne a jeho rýchlosť určuje tempo, akým entropia prechádza cez bariéru: beží rýchlejšie, keď sa entropia vymieňa, a **úplne sa zastaví, keď sa nevymieňa**. V reverzibilnom režime s nízkou bariérou medzi veľkým krachom a nasledujúcim veľkým treskom *neuplynie žiadny vnútorný čas*, pretože sa vtedy neprenáša entropia, hoci laboratórne hodiny ďalej tikajú. Celková entropia oboch sektorov zostala v celom súbore údajov v rámci chybových intervalov konštantná, ako sa od uzavretého systému očakáva.
- **Rôzne režimy dávajú rôzne „časy“.** Keď sa bariéra zvýši, výmena entropie sa zmenší, takže vnútorné hodiny bežia pomalšie. Ak sa bariéra zvýši natoľko, že oba sektory spolu takmer nekomunikujú, svetlý sektor sa približuje stavu, ktorý článok nazýva „**tepelná smrť**“: stacionárnemu stavu, v ktorom sa entropický čas jednoducho zastaví.
- **Efektívna rovnica reprodukuje dáta.** Schrödingerova rovnica v entropickom čase po dosadení experimentálnych parametrov numericky obnovuje nameraný vývoj šírky oblaku. Článok uvádza vynikajúcu zhodu pre prípad nízkej bariéry, v ktorom dominuje člen poháňaný entropiou; explicitné numerické porovnanie je vykonané práve pre tento prípad.

Čo je „problém času“ a čo tu znamená „entropický čas“

Problém času spočíva v tom, že hlavná rovnica kanonickej kvantovej gravitácie — Wheelerova-DeWittova rovnica — neobsahuje vonkajšiu časovú premennú. Častou odpoveďou je *relačný* prístup: jedna fyzikálna veličina vo vnútri systému sa povýši na „hodiny“ a všetko ostatné sa opisuje vzhľadom na ňu. Opakujúcou sa ťažkosťou je, že prirodzené kandidáty na hodiny nemusia byť monotónne — pri opätovne sa zmršťujúcom systéme sa kandidátske hodiny

najprv posúvajú dopredu a potom dozadu — a preto nemôžu jednoznačne označiť smer od začiatku do konca.
Entropický čas je Barontiniho spôsob, ako tento problém obísť. Namiesto čítania premennej podobnej polohe vytvára hodiny z *entropie* vymieňanej medzi pozorovaným a nepozorovaným sektorom a zostrojí ich tak, aby sa neobracali. Duchom sú blízke starším predstavám „tepelného času“, no tu sú operacionálne definované z merateľného toku entropie, nie z abstraktnej matematickej štruktúry — a práve preto ich možno testovať na skutočnom zariadení.
Kľúčové je, že kozmologické výrazy — „veľký tresk“, „veľký krach“, „mierkový faktor“, „skalárne pole“, „minivesmír“ — sú **analogické označenia**. Pomenúvajú vlastnosti zachyteného plynu atómov, ktoré sú *štrukturálne podobné* rovniciam zjednodušených kozmologických modelov. Nie sú to tvrdenia o skutočnom vesmíre.

Čo to nedokazuje

Práve tu je opatrnosť najdôležitejšia, pretože použitý slovník zvádza k preháňaniu.

- **Nerieši problém času a ani to netvrdí.** Samotný článok svoju úlohu opisuje tak, že „vytvára kontrolované experimentálne prostredie, v ktorom možno konštrukcie relačného času kvantitatívne testovať“. Skúšobná platforma nie je teoréma. Otázka, či je relačný alebo entropický čas *správnym* opisom času v kvantovej gravitácii, zostáva rovnako otvorená ako predtým.
- **Je to analógia, nie vesmír.** Nepozoruje sa žiadna kozmológia. Pozoruje sa Boseho-Einsteinov kondenzát v pasci a jeho redukovaný opis je *matematicky podobný* zjednodušenému kozmologickému modelu typu „minisuperspace“. Táto podobnosť je zmyslom experimentu, ale zároveň aj jeho hranicou. Nič tu neukazuje, že raný vesmír prešiel veľkým treskom tohto druhu, že časopriestor pozostáva z atómov alebo že „čas neexistuje“.
- **Neukazuje, že čas je „v skutočnosti“ entropia.** Entropické hodiny sú jedným umelo vytvoreným usporiadaním, ktoré v tomto systéme funguje dobre. Článok upozorňuje na konceptuálnu príbuznosť s hypotézou tepelného času, ale výslovne necháva otvorené, či sa oba pojmy vôbec zhodujú. Tvrdenie „vnútorné hodiny vytvorené z entropie dokážu usporiadať tento experiment“ je omnoho užšie než „čas je entropia“.
- **Efektívna rovnica je výsledkom modelovania, nie prepísaním kvantovej mechaniky.** Odvodená Schrödingerova rovnica v entropickom čase prechádza na bežnú kvantovú mechaniku, keď je tok entropie pomalý, a striktne zodpovedá obvyklej unitárnej teórii iba vtedy, keď nepreteká žiadna entropia. Článok ju označuje za všeobecnejšiu než štandardnú rovnicu *konkrétne v situácii, keď je pozorovaný systém termodynamicky otvorený voči nepozorovanému systému* — ide teda o tvrdenie o otvorených podsystémoch v tomto type usporiadania, nie o požiadavku prepísať základnú fyziku.
- **Je to jeden experiment, jeden autor a jedna voľba hodín.** Výsledky majú približne 5 % štatistickú neistotu na jeden dátový bod a opierajú sa o aproximáciu stredného poľa a priemerovanej hustoty. Voľba hodín aj spôsob zhrubnutia opisu sú zámernými modelovacími rozhodnutiami, ktoré budú musieť preveriť ďalšie skupiny skôr, než sa z nich vyvodia štrukturálne závery.

Aké silné sú dôkazy

Pre skromné tvrdenie, ktoré práca skutočne predkladá, sú dôkazy čisté. Systém je na príslušnej časovej škále naozaj dobre izolovaný, bilancia entropie sa uzatvára — celková entropia zostáva v rámci neistoty konštantná — vnútorné hodiny usporiadajú dáta takmer všade monotónne a efektívna rovnica, ktorú autor odvodil z rovnakého modelu s parametrami získanými z dát, reprodukuje nameranú dynamiku v prípade nízkej bariéry, na ktorý ju použil. Dáta sú verejne dostupné. Ide o skutočné meranie skutočného, ovládateľného systému, nie o myšlienkový experiment.

Zodpovedajúco skromná je aj váha, ktorú výsledok unesie. Všetko stojí na analógii medzi redukovaným modelom kondenzátu a kozmológiou typu minisuperspace; analógie osvetľujú, ale nedokazujú. Jediná platforma od jediného autora, na ktorej funguje jeden recept na vnútorný čas, je silným dôkazom uskutočniteľnosti a slabým základom pre tvrdenia o správaní času v prírode. Správne čítanie je: túto metódu už možno *urobiť* v laboratóriu a skontrolovať.

Prečo na tom záleží

Diskusie o probléme času dlho zostávali na úrovni formalizmu, kde je ťažké vyvrátiť súperiace návrhy, pretože poskytujú málo konkrétnych a merateľných predpovedí. Premeniť čo i len malú časť tejto diskusie na uskutočniteľný experiment — v ktorom vnútorné hodiny buď zoradia dáta, alebo nie, a efektívna rovnica ich buď opíše, alebo nie — mení povahu argumentu. Teoretikom dáva pracovný stôl, na ktorom môžu skúšať svoje nástroje.

To je skutočný prínos: nie odpoveď o čase, ale **miesto, kde sa dá otázka položiť kvantitatívne**. Platformy s ultrachladnými atómami už slúžili ako ovládateľné analógie Hawkingovho žiarenia, rozpínajúcich sa vesmírov a rozpadu falošného vákua; táto práca pridáva do súboru nástrojov relačný čas a šípku času. Hodnota spočíva v následných experimentoch, ktoré umožňuje — iné voľby hodín, odrážajúce sa oproti singularitným priebehom, testy reverzibility — pričom každý z nich už môže byť meraním, nielen výpočtom.

Stručné zhrnutie

Fyzik vytvoril Boseho-Einsteinov kondenzát, tenkou optickou bariérou ho rozdelil na pozorovanú a nepozorovanú polovicu a pomocou entropie prúdiacej medzi oboma polovicami zostrojil vnútorný „entropický čas“. Tieto hodiny zoradia cyklus rozpínania a opätovného zmršťovania pozorovanej polovice, bežia rýchlo pri výmene entropie a zastavia sa, keď k nej nedochádza. Efektívna rovnica zapísaná v tomto vnútornom čase reprodukuje namerané dáta v skúmanom prípade nízkej bariéry. Usporiadanie je analógiou „problému času“ z kanonickej kvantovej gravitácie: „veľký tresk“, „veľký krach“ a „minivesmír“ sú označenia zachyteného plynu, ktorý je matematicky podobný zjednodušenému kozmologickému modelu. Ide o kontrolované skúšobné prostredie pre predstavy relačného času — nie riešenie problému času, nie tvrdenie o skutočnom vesmíre a nie dôkaz, že čas

je „v skutočnosti“ entropia.

Kontrola bez príkras

Čo práca ukazuje: V jednom dobre izolovanom systéme ultrachladných atómov môžu vnútorné hodiny definované výmenou entropie monotónne usporiadať pozorovanú dynamiku a efektívna rovnica „entropického času“ reprodukuje nameraný vývoj v skúmanom prípade nízkej bariéry.

Čo je vierohodné, ale nepreukázané: Že entropický alebo relačný čas je dobrým opisom času v skutočnej kvantovej gravitácii. Experiment podporuje seriózne skúmanie takýchto konštrukcií, ale nepotvrdzuje ich pre prírodu.

Čo práca neukazuje: Že problém času je vyriešený; že kvantová gravitácia je vyriešená; že vesmír začal veľkým treskom tohto druhu; že časopriestor vzniká z atómov; ani že „čas neexistuje“.

Hlavné obmedzenia: Jedna platforma, jediný autor a jediná voľba hodín; približne 5 % neistota na dátový bod; aproximácie stredného poľa a priemerovanej hustoty; a predovšetkým závislosť od analógie medzi zachyteným kondenzátom a zjednodušeným kozmologickým modelom.

Akú veľkú dôveru by mal mať bežný čitateľ? Vysokú dôveru, že experiment na vlastnom systéme urobil to, čo uvádza. Nízku dôveru v akýkoľvek skok od tejto analógie k tvrdeniam o čase v skutočnom vesmíre.

Zdroje

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