The Clean Paper

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

Një eksperiment me atome të ftohta teston 'problemin e kohës' të gravitetit kuantik — si analog laboratorik, jo si përgjigje

Në gravitetin kuantik kanonik, ekuacioni Wheeler-DeWitt nuk ka orë të jashtme për të renditur ngjarjet: ky është 'problemi i kohës'. Një eksperiment me një autor izolon një kondensat Bose-Einstein, e ndan me një barrierë të hollë optike në një sektor të pavëzhguar dhe një të vëzhguar dhe ndërton një orë të brendshme nga entropia që rrjedh mes tyre. Kjo 'kohë entropike' rendit zgjerimin dhe rikolapsin e sektorit të vëzhguar, ndërsa një ekuacion efektiv riprodhon të dhënat e matura në rastin me barrierë të ulët të shqyrtuar. Është një shtrat prove i kontrolluar për idetë e kohës relacionale: 'big bang', 'big crunch' dhe 'miniunivers' janë etiketa analoge për një gaz të bllokuar, jo kozmologji reale, dhe puna nuk pretendon të zgjidhë problemin e kohës ose gravitetin kuantik.

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

Një orë e ndërtuar nga entropia, brenda një kurthi

Në gravitetin kuantik kanonik ekziston një enigmë e çuditshme dhe kokëfortë: ekuacioni qendror nuk ka kohë brenda tij. Ekuacioni Wheeler-DeWitt, gjëja më e afërt me një ekuacion të Schrödinger-it për gjithë universin, thotë thjesht se një operator i caktuar që vepron mbi gjendjen jep zero. Nuk ka parametër të jashtëm që troket, asgjë që rendit "para" dhe "pas" — e megjithatë ne e përjetojmë qartë kalimin e kohës. Ky është **problemi i kohës**, dhe i ka rezistuar zgjidhjes për më shumë se gjysmë shekulli.

Një punim me një autor të vetëm në *Physical Review Research* nuk e zgjidh atë. Ajo që bën është më e qetë dhe, në mënyrën e vet, më e dobishme: ndërton një sistem të vogël laboratorik, të kontrolluar mirë, ku një familje përgjigjesh të propozuara mund të **testohet kundrejt të dhënave reale**. Giovanni Barontini, në University of Birmingham, merr një kondensat Bose-Einstein — një re atomesh ultra-tëftohta që sillet si një objekt i vetëm kuantik — dhe e shndërron në një analog mbi të cilin ideja e një kohe "të brendshme", relacionale, mund të matet në vend që vetëm të debatohet. Truku është të ndërtohet një orë jo nga një kronometër i jashtëm, por nga entropia që sistemi e zhvendos brenda vetes.

Distanca mes "një analog i kontrolluar i problemit të kohës" dhe "fizikanët zgjidhën kohën" është e gjithë historia këtu — dhe është një distancë e madhe.

Çfarë bëri studiuesi

Aparatura është një kondensat me rreth **24,000 atome rubidium-87** të mbajtura në një kurth optik dipolar konservativ dhe të vëna në lëkundje — e gjithë reja atomike lëviz para-mbrapa nëpër kurth. Një **barrierë e hollë optike** — afërsisht 8 mikrometra e gjerë, e krijuar me dritë 675 nm duke përdorur një pajisje dixhitale me mikropasqyra — e ndan kurthin në dy gjysma. Njëra gjysmë vëzhgohet ("**sektori i ndritshëm**"); tjetra jo ("**sektori i errët**"). Gjatë dritares afërsisht 100-milisekondëshe të eksperimentit sistemi nuk tregon humbje të matshme grimcash ose disipim, kështu që me përafrim të mirë është një sistem i mbyllur me një Hamiltonian që vetë nuk varet nga koha.

[figure_pair pending]

Majtas, kurthi magneto-optik prodhon renë e ftohtë të atomeve të rubidiumit brenda qelizës prej qelqi: një fazë e hershme ftohjeje gjatë përgatitjes së kondensatit. Djathtas, Giovanni Barontini qëndron pranë aparaturës optike. Këto janë fotografi të sistemit laboratorik pas eksperimentit, jo imazhe të një universi të mirëfilltë në miniaturë.

Kur vëzhgohet me një orë të zakonshme laboratorike — një imazh absorbimi çdo 2 ms — sektori i ndritshëm bën diçka sugjestive. Atomet rrjedhin përmes barrierës dhe sektori rritet nga asgjëja (Barontini e etiketon këtë çast "**big bang**"), arrin një shtrirje maksimale, pastaj tkurret dhe zbrazet përsëri drejt anës së errët ("**big crunch**"). Në varësi të lartësisë së barrierës, kjo mund të përsëritet në mënyrë ciklike.

Pastaj vjen pika e vërtetë. Ora laboratorike është *e jashtme* ndaj sistemit — pikërisht lloji i gjësë që

mjedisi Wheeler-DeWitt nuk e lejon. Prandaj Barontini pyet: a mund të **renditet historia e sektorit të ndritshëm vetëm me madhësi të brendshme të sistemit**? Përgjigjja e tij është një orë që e quan **kohë entropike**, e lexuar drejtpërdrejt nga të njëjtat imazhe në tri hapa të thjeshtë. Së pari, nga çdo imazh absorbimi ai nxjerr katër numra për sektorin e ndritshëm: numrin e atomeve, qendrën e masës së profilit të dendësisë (që luan rolin e një "fushe skalare" analoge), gjerësinë dhe entropinë — entropinë për atom, të marrë me një metodë standarde, shumëzuar me numrin e atomeve. Së dyti, ndërsa atomet kalojnë barrierën, kjo entropi rritet dhe bie. Së treti, ora ndjek gradientin e entropisë përgjatë rrugës së matur të qendrës së masës, duke numëruar madhësinë e çdo zhvendosjeje dhe jo drejtimin e saj. Kur entropia dhe qendra e masës rriten ose bien së bashku, çdo hap e çon orën përpara edhe kur reja kthehet. Në të dhëna kjo jep një renditje të vetme nga "big bang" i sektorit te "big crunch" pothuajse kudo, me vetëm disa luhatje të vogla aty ku kampionimi i rrallë bën që këto dy ndryshime të mos përputhen.

Në fund, ai nxjerr një **"ekuacion Schrödinger në kohë entropike"** efektiv — një ekuacion evolucioni për sektorin e ndritshëm të shkruar në terma të kësaj ore të brendshme në vend të orës së jashtme — dhe e zgjidh numerikisht për të parë nëse riprodhon atë që kamera regjistroi realisht.

Çfarë u gjet

Tri rezultate, me ambicie në rritje.

- **Ora e brendshme funksionon si renditje.** Koha entropike rritet në mënyrë monotone pothuajse kudo dhe shpejtësia e saj përcaktohet nga sa shpejt kalon entropia përmes barrierës: ecën më shpejt kur entropia shkëmbehet dhe **ndalon plotësisht kur nuk ka shkëmbim**. Në regjimin e kthyeshëm me barrierë të ulët, *nuk kalon fare kohë e brendshme* midis një big crunch dhe big bang-ut tjetër — sepse aty nuk shkëmbehet entropi — edhe pse ora laboratorike vazhdon të ecë. Në gjithë grupin e të dhënave, entropia totale e të dy sektorëve së bashku mbeti konstante brenda shiritave të gabimit, siç kërkon një sistem i mbyllur.
- **Regjime të ndryshme japin "kohë" të ndryshme.** Rriteni barrierën dhe shkëmbimi i entropisë zvogëlohet, kështu që ora e brendshme ecën më ngadalë. Shtyjeni deri në pikën ku dy sektorët pothuajse nuk komunikojnë dhe sektori i ndritshëm shkon drejt asaj që punimi e quan "**vdekje termike**": një gjendje stacionare në të cilën koha entropike thjesht ndalet.
- **Një ekuacion efektiv riprodhon të dhënat.** Ekuacioni Schrödinger në kohë entropike, i ushqyer me parametrat eksperimentalë, rikuperon numerikisht evolucionin e matur të gjerësisë së resë, me punimin që raporton përputhje të shkëlqyer për rastin me barrierë të ulët (ku dominon termi i drejtuar nga entropia); krahasimi i qartë numerik bëhet për atë rast.

> **Çfarë është "problemi i kohës" dhe çfarë është këtu "koha entropike"**
>
> **Problemi i kohës** është se ekuacioni kryesor i gravitetit kuantik kanonik (Wheeler-DeWitt) nuk ka një ndryshore kohe të jashtme. Një përgjigje e zakonshme është *relacionale*: ngrije një madhësi fizike brenda sistemit në rolin e "orës" dhe përshkruaji të gjitha të tjerat në raport me

> të. Një vështirësi e përsëritur është se zgjedhjet natyrore të orës nuk janë gjithmonë monotone — një sistem që rikolapson e çon orën kandidate përpara dhe pastaj mbrapsht — kështu që ajo nuk mund të etiketojë pastër një drejtim të vetëm nga fillimi në fund.
> **Koha entropike** është mënyra e Barontinit për ta shmangur këtë. Në vend që të lexojë një ndryshore të ngjashme me pozicionin, ai e ndërton orën nga *entropia* e shkëmbyer midis sektorëve të vëzhguar dhe të pavëzhguar, në mënyrë që ajo të mos kthehet mbrapsht. Në frymë lidhet ngushtë me idetë më të vjetra të "kohës termike", por këtu përkufizohet operacionalisht nga një rrjedhje entropie e matshme dhe jo nga strukturë abstrakte matematikore — pikërisht kjo e bën të testueshme në një aparaturë reale.
> Në mënyrë vendimtare, fjalët kozmologjike — "big bang", "big crunch", "faktor shkalle", "fushë skalare", "miniunivers" — janë **etiketa analoge**. Ato emërtojnë veçori të një gazi atomesh të bllokuar që ndodh të jenë *strukturalisht të ngjashme* me ekuacionet e modeleve të thjeshtuara kozmologjike. Nuk janë pohime për universin real.

Çfarë nuk provon kjo

Këtu kujdesi ka rëndësi më shumë se kudo, sepse fjalori fton ekzagjerim.

- **Nuk e zgjidh problemin e kohës dhe nuk pretendon ta zgjidhë.** Vetë punimi e formulon kontributin si vendosjen e "një mjedisi të kontrolluar eksperimental ku ndërtimet e kohës relacionale mund të testohen në mënyrë sasiore". Një shtrat prove nuk është teoremë. Nëse koha relacionale ose entropike është rrëfimi *i duhur* për kohën në gravitetin kuantik mbetet po aq e hapur sa më parë.
- **Është analog, jo universi.** Nuk po vëzhgohet kozmologjia. Po vëzhgohet një kondensat Bose-Einstein në një kurth dhe përshkrimi i tij i reduktuar është *matematikisht i ngjashëm* me një model kozmologjik të thjeshtuar ("minisuperspace"). Ngjashmëria është pika e eksperimentit; është edhe kufiri i tij. Asgjë këtu nuk tregon se universi i hershëm pati një big bang të këtij lloji, se hapësirë-koha përbëhet nga atome ose se "koha nuk ekziston".
- **Nuk tregon se koha është 'në të vërtetë' entropi.** Ora entropike është një renditje e ndërtuar që funksionon mirë në këtë sistem. Punimi vëren afërsi konceptuale me hipotezën e kohës termike, por e lë shprehimisht të hapur nëse të dyja përkojnë. "Një orë e brendshme e ndërtuar nga entropia mund ta rendisë këtë eksperiment" është pretendim shumë më i ngushtë se "koha është entropi".
- **Ekuacioni efektiv është rezultat modelimi, jo rishkrim i mekanikës kuantike.** Ekuacioni i nxjerrë Schrödinger në kohë entropike reduktohet në mekanikën e zakonshme kuantike kur rrjedhja e entropisë është e ngadaltë dhe është saktësisht teoria e zakonshme unitare vetëm kur nuk rrjedh fare entropi. Punimi e pozicionon si më të përgjithshëm se ekuacioni standard *pikërisht kur një sistem i vëzhguar është termodinamikisht i hapur ndaj një sistemi të pavëzhguar* — pohim për nënsisteme të hapura në këtë lloj konfigurimi, jo pretendim se fizika themelore duhet rishkruar në këtë mënyrë.
- **Është një eksperiment, një autor, një zgjedhje ore.** Rezultatet kanë afërsisht 5% pasiguri statis-

tikore për çdo pikë dhe mbështeten në përafrime të fushës mesatare dhe dendësisë së mesatarizuar. Ora e zgjedhur dhe coarse-graining janë vendime të qëllimshme modelimi, të llojit që grupe të tjera do të duan t'i shqyrtojnë përpara se të nxjerrin përfundime strukturore.

Sa të forta janë provat

Për pretendimin modest që bën realisht, provat janë të pastra. Sistemi është vërtet i izoluar mirë në shkallën kohore përkatëse, kontabiliteti i entropisë mbyllet (entropia totale konstante brenda gabimit), ora e brendshme i rendit të dhënat në mënyrë monotone pothuajse kudo dhe një ekuacion efektiv, i nxjerrë nga autori nga i njëjti model me parametra të nxjerrë nga të dhënat, riprodhon dinamikën e matur për rastin me barrierë të ulët ku u aplikua. Të dhënat janë hapur të disponueshme. Kjo është matje reale e një sistemi real e të kontrollueshëm, jo eksperiment mendimi.

Pesha që mund të mbajë është përkatësisht modeste. Gjithçka mbështetet në analogjinë mes modelit të reduktuar të kondensatit dhe kozmologjisë minisuperspace, dhe analogjitë ndriçojnë pa provuar. Një platformë e vetme, nga një autor i vetëm, që tregon se një recetë e kohës së brendshme funksionon është provë e fortë parimore dhe bazë e dobët për çdo pretendim se si sillet koha në natyrë. Leximi i duhur është: metoda tani është diçka që mund *ta bësh* në laborator dhe ta kontrollosh.

Pse ka rëndësi

Debatet për problemin e kohës kanë mbetur prej kohësh në nivelin e formalizmit, ku propozimet konkurruese janë të vështira për t'u falsifikuar sepse bëjnë pak parashikime konkrete e të matshme. Shndërrimi qoftë edhe i një cepi të këtij debati në një eksperiment që mund ta kryesh — ku një orë e brendshme ose i rendit të dhënat ose jo, ku një ekuacion efektiv ose përshtatet ose jo — e ndryshon karakterin e debatit. U jep teoricienëve një stol pune ku të testojnë makinerinë e tyre.

Ky është kontributi i mirëfilltë: jo një përgjigje për kohën, por një **vend ku pyetja mund të bëhet në mënyrë sasiore**. Platformat me atome të ftohta kanë shërbyer tashmë si analoge të kontrollueshme për rrezatimin Hawking, universe në zgjerim dhe prishjen e vakumit të rremë; kjo shton kohën relacionale dhe shigjetën e kohës në atë kuti mjetesh. Vlera qëndron te ndjekjet që mundëson — zgjedhje të ndryshme ore, sjellje me rikthim kundrejt singularitetit, teste kthyeshmërie — secila tani matje dhe jo vetëm llogaritje.

Përmbledhje e shkurtër

Një fizikant ndërtoi një kondensat Bose-Einstein, e ndau me një barrierë të hollë optike në një gjysmë të vëzhguar dhe një të pavëzhguar dhe përdori entropinë që rrjedh midis gjysmave për të ndërtuar një "kohë entropike" të brendshme. Kjo orë rendit ciklin e zgjerimit dhe rikolapsit të gjysmës së vëzhguar,

ecën shpejt kur shkëmbehet entropi dhe ndalon kur nuk shkëmbehet, ndërsa një ekuacion efektiv i shkruar në këtë kohë të brendshme riprodhon të dhënat e matura në rastin me barrierë të ulët që autori shqyrtoi. Konfigurimi është analog i "problemit të kohës" nga graviteti kuantik kanonik: "big bang", "big crunch" dhe "miniunivers" janë etiketa për një gaz të bllokuar që është matematikisht i ngjashëm me një model të thjeshtuar kozmologjik. Është shtrat prove i kontrolluar për ide të kohës relacionale — jo zgjidhje e problemit të kohës, jo pretendim për universin real dhe jo provë se koha është "në të vërtetë" entropi.

Kontroll pa teprime

Çfarë tregon punimi: Në një sistem të izoluar mirë me atome të ftohta, një orë e brendshme e përkufizuar nga shkëmbimi i entropisë mund ta rendisë në mënyrë monotone dinamikën e vëzhguar, dhe një ekuacion efektiv "në kohë entropike" riprodhon evolucionin e matur në rastin me barrierë të ulët të shqyrtuar.

Çfarë është e besueshme, por nuk tregohet: Që koha entropike ose relacionale është një përshkrim i mirë i kohës në gravitetin kuantik real. Eksperimenti përputhet me trajtimin serioz të këtyre ndërtimeve; nuk i konfirmon për natyrën.

Çfarë nuk tregon: Që problemi i kohës është zgjidhur; që graviteti kuantik është zgjidhur; që universi filloi me një big bang të këtij lloji; që hapësirë-koha del nga atomet; ose që "koha nuk ekziston".

Kufizimet kryesore: Një platformë e vetme, një autor dhe një zgjedhje e vetme ore; afërsisht 5% pasiguri për pikë; përafrime të fushës mesatare dhe dendësisë së mesatarizuar; dhe, mbi të gjitha, mbështetja në një analogji mes një kondensati të bllokuar dhe një modeli kozmologjik të thjeshtuar.

Sa besim duhet të ketë një lexues i përgjithshëm? Besim të lartë se eksperimenti bëri atë që raporton brenda sistemit të vet. Besim të ulët për çdo kapërcim nga ky analog te pretendimet mbi kohën në universin real.

Burimet

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