The
CLEAN PAPER

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

Qorannoon cold-atom tokko 'problem of time' quantum gravity qorata — analog laaboraatoorii ta'ee, deebii ta'ee miti

Canonical quantum gravity keessatti, walqixxummaan Wheeler-DeWitt sa'aatii alaa events tartiibessu hin qabu: kun 'problem of time' jedhama. Qorannoon barreessaa tokko condensate Bose-Einstein isolate godhee, optical barrier haphii tokkoon sector hin ilaalamne fi ilaalametti qooda, entropy isaan gidduu yaa'u irraa sa'aatii keessaa ijaara. 'Entropic time' sun expansion fi recollapse sector ilaalame tartiibessa; walqixxummaan bu'a qabeessa regime daangaa gadi-aanaa qoratame keessatti data safarame deebisee uuma. Kun testbed relational-time ideas to'atame dha: 'big bang', 'big crunch' fi 'miniuniverse' label analog gaazii trap keessa jiruuf kennamaniidha, cosmology dhugaa miti; hojii kun problem of time ykn quantum gravity furuu isaa hin claim godhu.

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

Sa'aatii entiroopii irraa ijaarame, trap tokko keessa

Canonical quantum gravity keessatti rakkoon adda ta'e, yeroo dheeraaf furmaata dide tokko jira: walqixxummaan ijoo yeroo of keessaa hin qabu. Walqixxummaa Wheeler-DeWitt, kan addunyaa guutuuf walqixxummaa Schrodinger waliin caalaatti wal fakkaatu, operator tokko haala irratti hojjechuun zero akka kennu qofa dubbata. Paaraameetira alaa yeroo lakkaa'u hin jiru, wanti "dura" fi "booda" tartiibessu hin jiru — garuu nuti yeroo darbu ifatti ni muuxanna. Kun **rakkoo of yeroo** jedhama; walakkaa jaarraa caalaaf furmaata dideera.

Barruun barreessaa tokko qofa qabu, *Fiizikaalaa Gamaaggama Research* keessatti maxxanfame, rakkoo kana hin furu. Wanti inni godhu caalaatti callisaa fi karaa isaatiin caalaatti faayidaa qabu: sirna laaboraatoorii xiqqaa, sirriitti to'atame tokko ijaara, keessatti maatiin deebiiwwan yaadame tokko **daataa dhugaa waliin qoratamuu** danda'a. Giovanni Barontini, University of Birmingham irraa, Bose-Einstein condensate — duumessa atoomota baay'ee qabbanaa'oo ta'anii akka object quantum tokkootti socho'an — fudhatee, yaada yeroo "keessaa", relational yeroo jedhu irratti walfalmii qofa osoo hin taane safara gochuun akka danda'amu analog godha. Mala isaa jechuun sa'aatii stopwatch alaa irraa osoo hin taane, entiroopii systemichi keessaa keessa wal jijjiiru irraa ijaaruu dha.

Fageenyi "analog to'atame rakkoo of yeroo" fi "physicists yeroo furaniiru" gidduu jiru seenaa guutuu kanaa dha — fageenya guddaa dha.

Qorataan maal godhe

Meeshaan qorannoo condensate **atoomota rubidium-87 naannoo 24,000** qabu, conservative optical dipole trap keessatti qabame, akka duumessi atoomii guutuun trap keessa gara fuulduraa fi duubaatti raafamu taasifame. **Daangaan optical haphii** — bal'ina naannoo micrometre 8, ifa 675 nm'n digital micromirror device fayyadamuun dibame — trap bakka lamatti qooda. Kutaan tokko ni ilaalama ("**bright kutaa**"); inni biraa hin ilaalamu ("**dark kutaa**"). Yeroo qorannoo naannoo millisecond 100 keessatti, systemichi zarraa dhabamuu ykn dissipation safaramu hin agarsiisu; kanaaf tilmaama gaariidhaan sirna cufaa, Hamiltonian isaa mataan isaa yeroo irratti hin hundoofne, jedhamee ilaalamuu danda'a.

[figure_pair pending]

Bitaa irratti, magneto-optical trap duumessa rubidium qabbanaa'aa seelii glass keessaa uuma: kun condensate qopheessuuf deemsa qabbaneessuu jalqabaa keessaa tokko. Mirga irratti, Giovanni Barontini meeshaa optical bira dhaabbata. Kun suuraalee sirna laaboraatoorii qorannoo kana duuba jiruuti; suuraawwan addunyaa xiqqaa dhugaa miti.

Sa'aatii laaboraatoorii idilee — absorption image tokko millisecond 2 hunda — fayyadamuun bright kutaa ilaalame yeroo ta'u, wanta yaadannoo cosmology kaasuu tokko godha. Atoomonni daangaa ce'anii kutaan sun homaa irraa guddachuu jalqaba (Barontini yeroo kana "**big bang**" jedha), hamma

guddaa ga'a, sana booda walitti deebi'ee duwwaa ta'ee gara dark side deebi'a ("**big crunch**"). Hojjaan daangaa hammam ol ta'uu irratti hundaa'uun, kun marsaa keessatti irra deebi'uu danda'a.

Sana booda kaayyoon dhugaa dhufa. Sa'aatiin laaboraatoorii systemichaaf *alaa* dha — gosa wanta haalli Wheeler-DeWitt hayyamuu dide. Kanaaf Barontini gaafata: seenaa bright kutaa **baay'ina sirna keessaa qofa fayyadamuun tartiibessuun ni danda'amaa?** Deebiin isaa sa'aatii inni **entropic yeroo** jedhu, suuraalee sanuma irraa tarkaanfii sadii salphaan dubbifamu. Tokkoffaa, absorption image tokko tokko irraa bright kutaa'f lakkoofsa afur baasa: lakkoofsa atoomota isaa, giddugala of maassaa density profile isaa (kan analog "scalar damee" ta'ee tajaajilu), bal'ina isaa, fi entiroopii isaa — entiroopii atomii tokkoof argamu, mala istaandaardii ta'een, lakkoofsa atoomotaatiin baay'ifame. Lammaffaa, atoomonni daangaa ce'aa yeroo deeman entiroopii sun ol fi gadi deema. Sadaffaa, sa'aatiin entiroopii gradient karaa center-of-mass safarame irratti hordofa; direction isaa osoo hin taane, magnitude displacement tokko tokko lakkaa'a. Entiroopii fi giddugala of maassaa yeroo waliin ol ykn gadi deeman, cloudichi kallattii jijjiirus tarkaanfiin hundi sa'aatii fuuldura deemsisa. Daataa keessatti kun jechuun ni danda'ama bakka hunda "big bang" bright kutaa irraa hanga "big crunch" isaatti tartiiba tokko kenna; bakka muraasa qofa irratti saamudaa fudhachuu bal'aan jijjiiramawwan lamaan wal hin simsiisuun wiggle xiqqoo jira.

Dhuma irratti, inni **"entropic-time Schrodinger equation"** bu'a qabeessa tokko baasa — walqixxummaa evolution bright kutaa kana sa'aatii keessaa kanaan, sa'aatii alaa osoo hin taane, ibsu — fi numerically hiikee waan camera'n galmeesse deebisee uumuu danda'aa laata jedhee ilaala.

Maal argatan

Bu'aawwan sadii, kaka'umsa isaanii dabalaa deemu.

- **Sa'aatiin keessaa akka tartiibaatti hojjeta.** Entropic yeroo jechuun ni danda'ama bakka hunda monotonically guddata; saffisni isaa entiroopii daangaa ce'u saffisa hammam akka ta'een murtaa'a: yeroo entiroopii wal jijjiiru saffisaan deema, yeroo **homtuu wal hin jijjiiramne guutumaan dhaabbata**. Haala reversible, daangaa gadi-aanaa keessatti, big crunch tokko fi big bang itti aanu gidduutti *yeroon keessaa tokko iyyuu hin darbu* — sababni isaa entiroopii achitti wal hin jijjiiramne — sa'aatiin laaboraatoorii garuu itti fufa. kuusaa daataa guutuu keessatti entiroopii waliigalaa kutaa lamaan walitti qabamee dogoggora bar keessatti dhaabbataa ture, akka sirna cufaan barbaadu.
- **Haala adda addaa "yeroo" adda addaa kennu.** Hojjaa daangaa ol kaasi, wal-jijjiirraan entiroopii xiqqaata; kanaaf sa'aatiin keessaa suuta deema. Hammasaan kutaa lamaan walitti qunnamuu jechuun ni danda'ama dhaabanitti geessi, bright kutaa gara waan barruun "**ho'a death**" jedhuutti tasgabbaa'a: haala dhaabbataa entropic yeroo keessatti guutumaan dhaabbatu.
- **Walqixxummaan bu'a qabeessa daataa deebisee uuma.** Entropic-time Schrodinger equation, paaraameetira qorannoo itti galchuun, evolution bal'ina cloud safarame numerically deebisee argamsiisa; barruun haala daangaa gadi-aanaa keessatti (bakka termiin entiroopii'n oofamu ol-aantummaa qabu) waliigaltee baay'ee gaarii akka qabu gabaasa. Walbira qabni numeric ifatti haala sanaaf qofa taasifame.

"Rakkoo of yeroo" maal akka ta'e, fi "entropic yeroo" as keessatti maal akka ta'e

Rakkoo of yeroo jechuun walqixxummaan ijoo canonical quantum gravity (Wheeler-DeWitt) jijjiiramaa yeroo alaa hin qabu. Deebiin yeroo baay'ee kennamu *relational* dha: baay'ina qaamaa sirna keessaa tokko "sa'aatii" godhanii, waan biraa hunda isa waliin walitti dhufeenyaan ibsuu. Rakkoon yeroo baay'ee mudatu, filannoon sa'aatii uumamaa yeroo hunda monotonic miti — sirna deebi'ee walitti kufu kan filatame clock duratti fi boodaatti deemsisa — kanaaf jalqaba irraa hanga xumuraatti direction tokko qulqulluun label gochuu hin danda'u.
Entropic yeroo Barontini'n rakkoo kana ittiin darbuudha. Jijjiiramaa bakka fakkaatu dubbisuu mannaa, sa'aatii *entiroopii* kutaa ilaalamee fi hin ilaalamne gidduu wal jijjiiramu irraa ijaara; akka inni duubatti hin deebineetti qopheessa. Yaada "thermal yeroo" durii waliin hafuuraan walitti dhiyaata, garuu as keessatti entiroopii flow safaramuu danda'u irraa hojii irra ooluu danda'uun ibsame, herregaa caasaa abstract irraa osoo hin taane — kunis meeshaa dhugaa irratti qoratamuu akka danda'u taasisa.
Waan murteessaa ta'e, jechoonni cosmology — "big bang", "big crunch", "safartuu faaktara", "scalar damee", "miniuniverse" — **label analog** dha. Isaan amala gaazii atoomotaa trap keessa jiru, walqixxummaa modeloota cosmology salphifaman waliin *caasaa'n wal fakkaatu*, maqaa kennu. Waa'ee addunyaa dhugaa irratti ibsa miti.

Kun maal hin mirkaneessu

As keessatti of-eeggannoon baay'ee barbaachisaa dha, sababni isaa jechoonni fayyadaman garmalee hiikuu nama affeeru.

- **Rakkoo of yeroo hin furu, akkas jedhee hin himus.** Haalli barruu ofiin itti ibsu, inni "naannoo qorannoo to'atame kan relational-time constructions quantitatively qoratamuu danda'an hundeessa" jedhu. Testbed tokko theorem miti. Relational ykn entropic yeroo'n quantum gravity keessatti ibsa yeroo *sirrii* ta'uu isaa gaaffiin akkuma duraan turetti banaa dha.
- **Analog dha, addunyaa miti.** Cosmology tokko hin ilaalamu. Bose-Einstein condensate trap keessa jiru ilaalama; reduced description isaa moodeela cosmology salphifame ("minisuperspace") waliin *mathematically wal fakkaata*. Wal fakkaachuun kun kaayyoo qorannoo ti; daangaa isaatis. As keessatti homtuu addunyaa jalqabaa big bang gosa kanaa qaba ture, yeroo-iddoo atoomota irraa ijaarame, ykn "yeroon hin jiru" hin agarsiisu.
- **Yeroon 'dhugumaan' entiroopii dha hin agarsiisu.** Entropic clock tartiiba ijaarame keessaa tokko qofa, sirna kana irratti sirriitti hojjetu. Barruun thermal-time hypothesis waliin walitti dhiyaachuu yaadaa qabaachuu isaa ibsa, garuu lamaan sun walumaagalatti wal qixxaataa laata jedhus banaa dhiisa. "Sa'aatiin keessaa entiroopii irraa ijaarame qorannoo kana tartiibessuu danda'a" jechuun "yeroon entiroopii dha" caalaa daangaa baay'ee dhiphaa qabu.
- **Walqixxummaan bu'a qabeessa modeling dha, quantum makaanikaa deebisee barreessuu miti.** Entropic-time Schrodinger equation'n entiroopii flow suuta ta'uu keessatti gara quantum makaanikaa idileetti deebi'a; lakki entiroopii flow ta'uu qofa keessatti tiyoorii unitary idilee sirriitti ta'a. Barruun inni istaandaardii equation caalaa waliigalaa ta'uu isaa *keessumaa yeroo*

mul'ate sirna thermodynamically banaa ta'ee unobserved sirna waliin wal jijjiiru irratti kaa'a — kun statement subsystem banaa gosa setup kanaa irratti, fiiziksii bu'uuraa akkanumaan deebisanii barreessuu qaba jedhu miti.

- **Qorannoo tokko, barreessaa tokko, filannoo sa'aatii tokko.** Bu'aawwan qabxii tokko tokko irratti tilmaamaan 5% shakkii istaatistikii qabu; dirree giddugaleessaa fi averaged-density approximation irratti hirkatu. Sa'aatiin filatame fi coarse-graining murtii modeling yaadamee fudhatame; gareewwan biroo xumura caasaa irraa kaasu dura isaan qorachuun isaanii eegama.

Ragaan hammam cimaa dha

Wanta daangaa qabu inni dhugumaan jedhuuf, ragaan qulqulluu dha. Systemichi yeroo barbaachisaa keessatti dhugumaan sirriitti isolated dha; bookkeeping entiroopii ni cufa (entiroopii waliigalaa dogoggora keessatti dhaabbataa); sa'aatiin keessaa jechuun ni danda'ama bakka hunda daataa monotonic tartiibessa; walqixxummaan bu'a qabeessa, barreessaan moodeela sanuma irraa paaraameetira daataa irraa tilmaamame waliin baase, dynamics safarame haala daangaa gadi-aanaa keessatti deebisee uuma. daataan banaa dha. Kun safara dhugaa sirna dhugaa, to'atamuu danda'u irratti; thought yaalii miti.

Ulfaatinni inni baachuu danda'u immoo akkuma kana daangaa qaba. Wanti hundi reduced condensate moodeela fi minisuperspace cosmology gidduu analog irratti hundaa'a; analog'n hubannoo bal'isa, garuu ragaa murteessaa miti. Platform tokko, barreessaa tokko, recipe yeroo keessaa tokko hojjechuu agarsiisu proof-of-principle cimaa dha; akka yeroon uumama keessatti itti hojjetu irratti hima guddaa jedhuuf bu'uura laafaa dha. Dubbisni sirrii: malichi amma laaboraatoorii keessatti *gochuu* fi qoruudhaan madaaluu danda'ama.

Maaliif barbaachisaa dha

Falmiin rakkoo of yeroo irratti yeroo dheeraaf sirna herregaa irratti hafeera; yaadawwan wal dorgoman falsify gochuun rakkisaa, sababni isaanii tilmaama safaramuu danda'u muraasa kennu. Falmiin kun keessaa kutaa xiqqoo illee qorannoo irra ooluu danda'uutti jijjiiruun — sa'aatiin keessaa daataa kee tartiibessaa moo hin tartiibessu, walqixxummaan bu'a qabeessa fit godhaa moo hin godhu — amala wal-falmii sana jijjiira. Theoristootaaf bench meeshaa isaanii itti qoran kenna.

Gumaachi dhugaa kana: waa'ee yeroo deebii miti, garuu **bakka gaaffii sana quantitatively gaafachuu dandeessu**. Platform cold-atom duraan Hawking radiation, addunyaa babal'atu fi false-vacuum decay'f analog to'atamuu danda'u ta'anii tajaajilaniiru; kun relational yeroo fi arrow of yeroo toolbox sana keessatti dabala. Gatiin isaa hordoffii inni bana keessatti — filannoo sa'aatii adda addaa, bouncing vs singular amala, qorannoo reversibility — tokkoon tokkoon isaanii amma safara ta'uu danda'u, shallaggii qofa osoo hin taane.

Cuunfaa gabaabaa

Physicist tokko Bose-Einstein condensate ijaaree, optical barrier haphii tokkoon kutaa ilaalamee fi kutaa hin ilaalamneetti qooduun, entiroopii kutaa lamaan gidduu yaa'u irraa sa'aatii keessaa "entropic yeroo" ijaare. Sa'aatiin sun marsaa babal'achuu fi deebi'ee walitti kufuu bright kutaa tartiibessa; yeroo entiroopii wal jijjiiramu saffisaan deema, yeroo hin jijjiiramne dhaabbata; walqixxummaan bu'a qabeessa sa'aatii keessaa kanaan barreeffame haala daangaa gadi-aanaa barreessaan qore keessatti daataa safarame deebisee uuma. Setup'n "rakkoo of yeroo" canonical quantum gravity keessaa analog dha: "big bang", "big crunch" fi "miniuniverse" label gaazii trap keessa jiru, moodeela cosmology salphifame waliin mathematically wal fakkaatuuf kennamaniidha. Kun testbed relational-time yaadota to'atame dha — rakkoo of yeroo'f furmaata miti, waa'ee addunyaa dhugaa irratti himannaa miti, yeroon "dhugumaan" entiroopii dha jedhuuf ragaa miti.

Sakatta'a ifaa

Wanti barruun agarsiisu: Sirna cold-atom sirriitti isolated ta'e tokko keessatti, sa'aatiin keessaa entiroopii exchange irraa ibsame dynamics ilaalame monotonic tartiibessuu danda'a; walqixxummaan "entropic-time" bu'a qabeessa haala daangaa gadi-aanaa qoratame keessatti evolution safarame deebisee uuma.

Wanti danda'amu garuu hin agarsiifamne: Entropic ykn relational yeroo'n quantum gravity dhugaa keessatti ibsa yeroo gaarii ta'uu. Qorannoon yaadawwan kana akkasumatti serioosii fudhachuuf walii gala; uumama irratti isaan hin mirkaneessu.

Wanti inni hin agarsiifne: Rakkoo of yeroo furame; quantum gravity furame; addunyaa big bang gosa kanaa keessatti jalqabe; yeroo-iddoo atoomota irraa emergent dha; ykn "yeroon hin jiru".

Daangaawwan ijoo: Platform tokko, barreessaa tokko fi filannoo sa'aatii tokko; shakkii qabxii tokko tokko irratti naannoo 5%; dirree giddugaleessaa fi averaged-density approximation; hunda caalaa analog condensate trap keessa jiru fi moodeela cosmology salphifame gidduu irratti hirkachuu.

Dubbisaan waliigalaa hammam amantaa qabaachuu qaba? Qorannoon sirna isaa irratti waan gabaase dhugumaan hojjete irratti amantaa guddaa. Analog kana irraa waa'ee yeroo addunyaa dhugaa keessatti himannaa godhamu irratti amantaa gadi-aanaa.

Maddoota

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