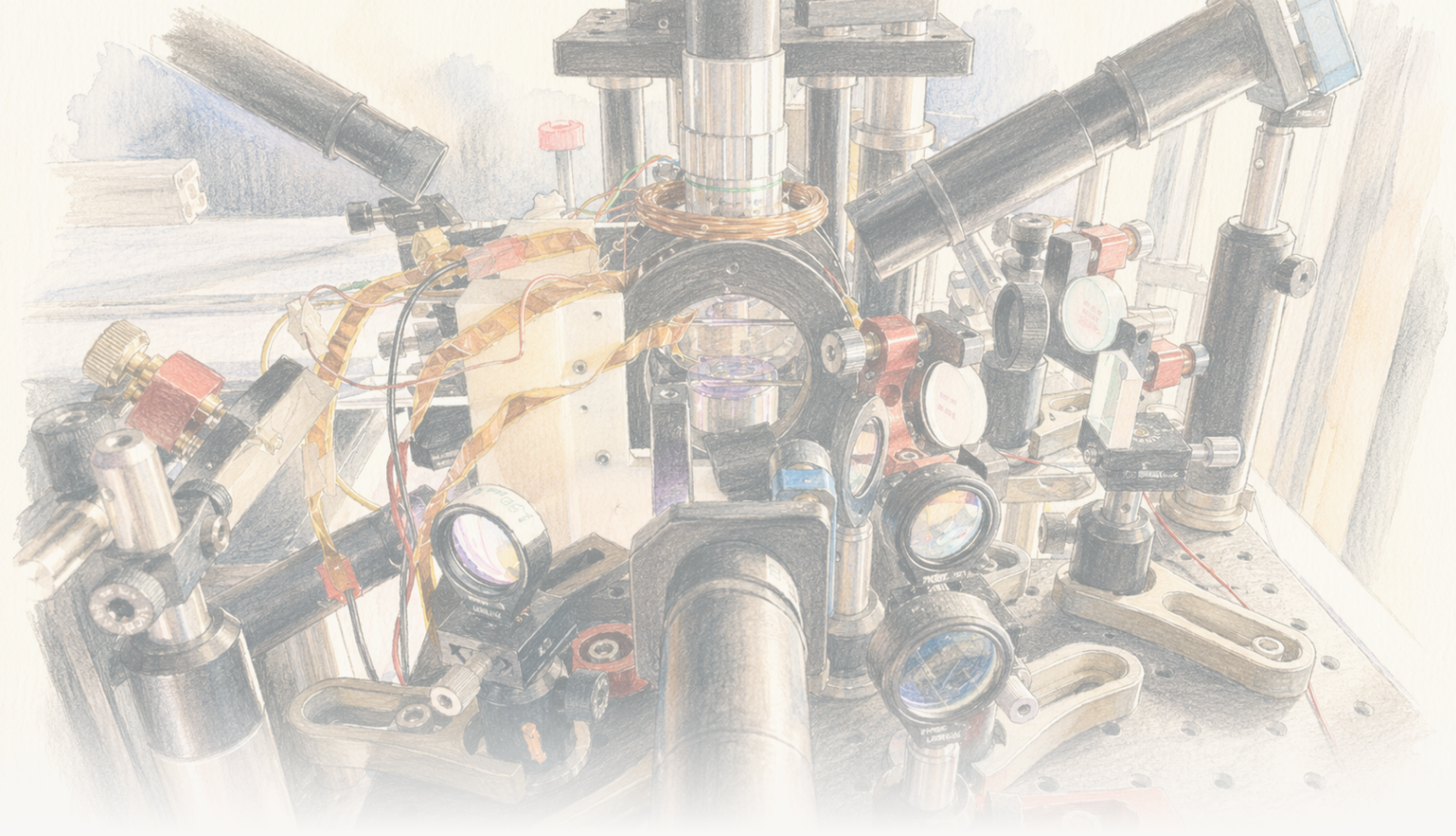




The CLEAN PAPER

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

Jaribio la atomi baridi linapima ‘tatizo la muda’ la mvuto wa kwanta — kama analogia ya maabara, si jibu

Katika mvuto wa kwanta wa kikanoni, mlinganyo wa Wheeler-DeWitt hauna saa ya nje ya kupanga matukio kwa mfuatano: hili ndilo ‘tatizo la muda’. Jaribio la mwandishi mmoja linatenga kondensati ya Bose-Einstein, linaigawanya kwa kizuizi chembamba cha mwanga kuwa sehemu isiyoangaliwa na sehemu inayoangaliwa, na kujenga saa ya ndani kutoka entropia inayopita kati yao. ‘Muda wa entropia’ huo hupanga upanuzi na kuporomoka tena kwa sehemu inayotazamwa, na mlinganyo wenye ufanisi huzalisha upya data zilizopimwa katika hali ya kizuizi cha chini iliyochunguzwa. Ni jukwaa linalodhibitiwa la kupima mawazo ya muda wa kimahusiano: ‘big bang’, ‘big crunch’ na ‘miniuniverse’ ni lebo za analogia kwa gesi iliyofungwa, si kosmolojia halisi, na kazi haidai kutatua tatizo la muda au mvuto wa kwanta.

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

Saa iliyojengwa kwa entropia, ndani ya mtego

Katika mvuto wa kwanta wa kikanoni kuna kitendawili cha ajabu na kigumu kuondoka: mlinganyo mkuu hauna muda ndani yake. Mlinganyo wa Wheeler-DeWitt, kitu kilicho karibu zaidi na mlinganyo wa Schrodinger kwa ulimwengu mzima, unasema tu kwamba mwendeshaji fulani akitenda juu ya hali hutoa sifuri. Hakuna kigezo cha nje kinachotiki, hakuna kitu cha kupanga “kabla” na “baada” — lakini sisi hupitia muda ukipita. Hili ndilo **tatizo la muda**, na limekataa suluhisho kwa zaidi ya nusu karne.

Makala ya mwandishi mmoja katika *Physical mapitio Research* hailitatu. Inachofanya ni cha utulivu zaidi na, kwa namna yake, chenye manufaa zaidi: inajenga mfumo mdogo wa maabara unaodhibitiwa vizuri ambamo familia moja ya majibu yaliyopendekezwa inaweza **kupimwa dhidi ya data halisi**. Giovanni Barontini, katika University of Birmingham, anachukua kondensati ya Bose-Einstein — wingu la atomi baridi sana linalotenda kama kitu kimoja cha kwanta — na kuligeuza kuwa analogia ambayo wazo la muda “wa ndani” na wa kimahusiano linaweza kupimwa badala ya kujadiliwa tu. Ujanja ni kujenga saa si kutoka chronometer ya nje, bali kutoka entropia ambayo mfumo unasambaza ndani yake mwenyewe.

Umbali kati ya “analogia inayodhibitiwa ya tatizo la muda” na “wanafizikia wametatua muda” ndiyo simulizi yote hapa, na ni umbali mrefu.

Mtafiti alifanya nini

Kifaa ni kondensati ya takriban **atomi 24,000 za rubidium-87** zilizoshikiliwa katika mtego wa dipole wa macho usiopoteza nishati na kuwekwa zikitikisika — wingu lote la atomi likisogea huku na huku katika mtego. **Kizuizi chembamba cha mwanga** — takriban mikromita 8 kwa upana, kilichochorwa kwa mwanga wa nm 675 kwa kutumia kifaa cha vioo vidogo vya kidijitali — kinagawanya mtego katika nusu mbili. Nusu moja inaangaliwa (“**bright sector**”); nyingine haizingatiwi moja kwa moja (“**dark sector**”). Katika dirisha la takriban milisekunde 100 la jaribio, mfumo hauonyeshi upotevu wa chembe au utawanyaji wa nishati unaopimika, kwa hiyo kwa makadirio mazuri ni mfumo uliofungwa wenye Hamiltonian ambayo yenyewe haitegemei muda.

[figure_pair pending]

Kushoto, mtego wa magneto-optical unatengeneza wingu baridi la atomi za rubidium ndani ya seli ya kioo: hatua ya mapema ya kupoza kuelekea kutayarisha kondensati. Kulia, Giovanni Barontini amesimama karibu na kifaa cha macho. Hizi ni picha za mfumo wa maabara uliotumika katika jaribio, si picha za ulimwengu mdogo halisi.

Ikiangaliwa kwa saa ya kawaida ya maabara — picha ya ufyonzaji kila ms 2 — bright sector hufanya kitu kinachokumbusha kosmolojia. Atomi huvuka kizuizi na sehemu hiyo hukua kutoka kutokuwa na kitu (Barontini anauita wakati huo “**big bang**”), hufikia ukubwa wa juu, kisha hukunjamana na kumwaga atomi kurudi upande wa dark (“**big crunch**”). Kutegemea urefu wa kizuizi, mzunguko huu unaweza kujirudia.

Kisha ndipo hoja kuu inapokuja. Saa ya maabara iko *nje* ya mfumo — aina hasa ya kitu ambacho mazingira ya Wheeler-DeWitt hayaruhusu. Kwa hiyo Barontini anauliza: je, historia ya bright sector inaweza **kupangwa kwa kutumia tu kiasi vilivyo ndani ya mfumo**? Jibu lake ni saa anayoiita **muda wa entropia**, inayosomwa moja kwa moja kutoka picha zilezile kwa hatua tatu rahisi. Kwanza, kutoka kila picha ya ufyonzaji anatoa nambari nne kwa bright sector: idadi ya atomi, kituo cha massa cha wasifu wa msongamano wake (kinachochukua jukumu la “uga wa skala” wa analojia), upana wake, na entropia yake — entropia kwa kila atomi, iliyopatikana kwa mbinu sanifu, ikizidishwa kwa idadi ya atomi. Pili, atomi zinapovuka kizuizi entropia hiyo hupanda na kushuka. Tatu, saa hufuata gradiento ya entropia pamoja na njia iliyopimwa ya kituo cha massa, ikihesabu ukubwa wa kila uhamisho badala ya mwelekeo wake. Entropia na kituo cha massa vinapopanda au kushuka pamoja, kila hatua husogeza saa mbele hata wingu linapogeuka. Katika data hii hutoa mpangilio mmoja kutoka “big bang” ya sehemu hadi “big crunch” yake karibu kila mahali, kukiwa na mitikisiko michache midogo pale sampuli zenye nafasi kubwa zinapofanya mabadiliko hayo mawili kutokubaliana.

Mwisho, anatoa “**mlinganyo wa Schrodinger wa muda wa entropia**” wenye ufanisi — mlinganyo wa mageuzi wa bright sector ulioandikwa kwa saa hii ya ndani badala ya ya nje — na kuutatua kwa nambari ili kuona kama unazalisha upya kile kamera ilirekodi.

Waligundua nini

Matokeo matatu, yakiongezeka kwa kiwango cha dai.

- **Saa ya ndani hufanya kazi kama mpangilio.** Muda wa entropia huongezeka kwa mwelekeo mmoja karibu kila mahali, na kasi yake huamuliwa na kasi ambayo entropia inavuka kizuizi: huenda haraka zaidi entropia inapobadilishana na **husimama kabisa wakati hakuna inayobadilishana**. Katika hali inayoweza kurudi nyuma yenye kizuizi cha chini, *hakuna muda wa ndani unaopita kabisa* kati ya big crunch na big bang inayofuata — kwa sababu hakuna entropia inayobadilishana hapo — ingawa saa ya maabara inaendelea kutiki. Katika data zote, entropia ya jumla ya sekta zote mbili pamoja ilibaki bila kubadilika ndani ya mipaka ya makosa, kama mfumo uliofungwa unavyohitaji.
- **Hali tofauti hutoa “muda” tofauti.** Ukiinua kizuizi, ubadilishanaji wa entropia hupungua, kwa hiyo saa ya ndani huenda polepole. Ukiifikisha mahali ambapo sekta mbili hazishirikiani karibu kabisa, bright sector hutulia kuelekea kile makala inachokiita “**heat death**”: hali tulivu ambamo muda wa entropia unasimama tu.
- **Mlinganyo wenye ufanisi huzalisha upya data.** Mlinganyo wa Schrodinger wa muda wa entropia, ukipewa vigezo vya majaribio, huzalisha kwa nambari mageuzi yaliyopimwa ya upana wa wingu, huku makala ikiripoti makubaliano mazuri sana kwa hali ya kizuizi cha chini (ambapo neno linaloendeshwa na entropia linatawala); ulinganisho wa wazi wa nambari umefanywa kwa hali hiyo.

“Tatizo la muda” ni nini, na “muda wa entropia” ni nini hapa

Tatizo la muda ni kwamba mlinganyo mkuu wa mvuto wa kwanta wa kikanoni (Wheeler-DeWitt) hauna kigezo cha muda wa nje. Jibu moja la kawaida ni la *kimahusiano*: chagua kiasi kimoja cha kimwili ndani ya mfumo kuwa “saa”, kisha eleza kila kitu kingine kwa kulinganisha nacho. Tatizo linalojirudia ni kwamba chaguo asilia za saa si kila mara za mwelekeo mmoja — mfumo unaoporomoka tena unaweza kuisogeza saa hiyo mbele kisha nyuma — hivyo haiwezi kutoa lebo safi ya mwelekeo mmoja kutoka mwanzo hadi mwisho.

Muda wa entropia ni njia ya Barontini ya kukwepa hilo. Badala ya kusoma kigezo kinachofanana na nafasi, anajenga saa kutoka *entropia* inayobadilishana kati ya sekta inayotazamwa na isiyotazamwa, kwa namna iliyoundwa ili isirudi nyuma. Kwa roho inahusiana na mawazo ya zamani ya “thermal time”, lakini hapa inafafanuliwa kiutendaji kutoka mtiririko wa entropia unaoweza kupimwa badala ya muundo wa kihisabati wa kidhahania — na hilo ndilo linalofanya iweze kupimwa katika kifaa halisi.

Muhimu zaidi, maneno ya kosmolojia — “big bang”, “big crunch”, “scale factor”, “scalar field”, “miniuniverse” — ni **lebo za analogia**. Yanataja sifa za gesi ya atomi iliyofungwa ambazo kwa muundo wa milinganyo zinafanana na mifano rahisi ya kosmolojia. Si kauli kuhusu Ulimwengu halisi.

Hili halithibitishi nini

Hapa ndipo uangalifu unahitajika zaidi, kwa sababu msamiati unakaribisha madai makubwa mno.

- **Halitatui tatizo la muda, wala halidai kulitatu.** Makala yenyewe inasema kazi “inaweka mazingira ya majaribio yanayodhibitiwa ambamo ujenzi wa muda wa kimahusiano unaweza kupimwa kwa kiasi.” Jukwaa la kupimia si theorem. Ikiwa muda wa kimahusiano au wa entropia ndio maelezo *sahihi* ya muda katika mvuto wa kwanta linaachwa wazi kama lilivyokuwa awali.
- **Ni analogia, si Ulimwengu.** Hakuna kosmolojia inayochunguzwa. Kinachochunguzwa ni kondensati ya Bose-Einstein katika mtego, na maelezo yake yaliyopunguzwa yanafanana *kihisabati* na mfano rahisi wa kosmolojia (“minisuperspace”). Ufanano huo ndio hoja ya jaribio; pia ndio mpaka wake. Hakuna kitu hapa kinachoonyesha kwamba Ulimwengu wa awali ulikuwa na big bang ya aina hii, kwamba anga-wakati imeundwa na atomi, au kwamba “muda haupo.”
- **Halionyeshi kwamba muda ‘kwa kweli’ ni entropia.** Saa ya entropia ni mpangilio mmoja uliotengenezwa unaofanya kazi vizuri kwenye mfumo huu. Makala inataja uhusiano wa kimawazo na dhana ya thermal time lakini inaacha wazi hata kama mawazo hayo mawili yanalingana. “Saa ya ndani iliyojengwa kutoka entropia inaweza kupanga jaribio hili” ni dai finyu sana kuliko “muda ni entropia.”
- **Mlinganyo wenye ufanisi ni tokeo la uundaji wa mfano, si uandishi upya wa mekanika ya kwanta.** Mlinganyo wa Schrodinger wa muda wa entropia uliotolewa hupungua kuwa mekanika ya kwanta ya kawaida wakati mtiririko wa entropia ni mdogo, na ni nadharia ya kawaida ya unitary kwa usahihi tu wakati hakuna entropia inayopita. Makala inauweka kama wa jumla zaidi kuliko mlinganyo sanifu *hasa pale mfumo unaotazamwa unapokuwa wazi kitermodinamiki kwa*

sehemu isiyotazamwa — kauli kuhusu sehemu wazi za mifumo katika mpangilio wa aina hii, si dai kwamba fizikia ya msingi lazima iandikwe upya hivi.

- **Ni jaribio moja, mwandishi mmoja, chaguo moja la saa.** Matokeo yana takriban 5% ya kutokuwa na uhakika wa kitakwimu kwa kila nukta na yanategemea makadirio ya uga-wastani na msongamano uliowastanisha. Saa iliyochaguliwa na kiwango cha kukusanya maelezo ni maamuzi ya kimfano ya makusudi ambayo vikundi vingine vitataka kuyajaribu kabla ya kutoa hitimisho za kimuundo.

Ushahidi una nguvu kiasi gani

Kwa dai dogo ambalo kazi inatoa kwa kweli, ushahidi ni safi. Mfumo umetengwa vizuri kwa kiwango cha muda husika, uhasibu wa entropia unafunga — entropia ya jumla inabaki thabiti ndani ya makosa — saa ya ndani inapanga data kwa mwelekeo mmoja karibu kila mahali, na mlinganyo wenye ufanisi, uliotolewa na mwandishi kutoka mfano uleule kwa vigezo vilivyokadiriwa kutoka data, huzalisha upya mienendo iliyopimwa kwa hali ya kizuizi cha chini ambayo ulitumika. Data zinapatikana wazi. Hiki ni kipimo halisi cha mfumo halisi unaoweza kudhibitiwa, si jaribio la mawazo.

Uzito wa dai unaloweza kubeba ni mdogo kwa namna inayolingana. Kila kitu kinategemea analogia kati ya mfano uliopunguzwa wa kondensati na kosmolojia ya minisuperspace, na analogia zinaweza kuangazia bila kuthibitisha. Jukwaa moja, kutoka mwandishi mmoja, likionyesha kwamba njia moja ya saa ya ndani inafanya kazi ni uthibitisho mzuri wa kanuni na msingi dhaifu kwa dai lolote kuhusu jinsi muda unavyotenda katika asili. Usomaji unaofaa ni huu: mbinu hii sasa ni kitu unachoweza *kufanya* maabara na kukikagua.

Kwa nini ni muhimu

Mijadala kuhusu tatizo la muda kwa muda mrefu imekwama katika kiwango cha urasmi, ambako mapendekezo yanayoshindana ni vigumu kuyakanusha kwa sababu yanatoa utabiri mchache unaoweza kupimwa. Kugeuza hata kona moja ya mjadala huo kuwa jaribio linaloweza kufanywa — ambapo saa ya ndani ama inapanga data au haipangi, ambapo mlinganyo wenye ufanisi ama unafaa data au haufai — hubadilisha tabia ya hoja. Inawapa wanadharia benchi la maabara la kujaribu zana zao.

Hilo ndilo mchango halisi: si jibu kuhusu muda, bali **mahali pa kuuliza swali kwa kiasi**. Majukwaa ya atomi baridi tayari yametumika kama analogia zinazodhibitiwa kwa mionzi ya Hawking, ulimwengu unaopanuka na kuoza kwa false vacuum; kazi hii inaongeza muda wa kimahusiano na mshale wa muda katika sanduku hilo la zana. Thamani iko katika tafiti zinazofuata ambazo inawezesha — chaguo tofauti za saa, tabia ya kuruka na kurudi dhidi ya singularity, majaribio ya uwezekano wa kurudi nyuma — kila moja sasa ikiwa kipimo badala ya hesabu pekee.

Muhtasari safi

Mwanafizikia alijenga kondensati ya Bose-Einstein, akaigawanya kwa kizuizi chembamba cha mwanga kuwa nusu inayoangaliwa na nusu isiyoangaliwa, na kutumia entropia inayopita kati ya nusu hizo kujenga “muda wa entropia” wa ndani. Saa hiyo inapanga mzunguko wa kupanuka na kuporomoka tena wa nusu inayoangaliwa, ikienda haraka entropia inapobadilishana na kusimama inapokosekana, na mlinganyo wenye ufanisi ulioandikwa kwa muda huu wa ndani huzalisha upya data zilizopimwa katika hali ya kizuizi cha chini iliyochunguzwa na mwandishi. Mpangilio ni analogia ya “tatizo la muda” katika mvuto wa kwanza wa kikanoni: “big bang”, “big crunch” na “miniuniverse” ni lebo za gesi iliyofungwa ambayo kihisabati inafanana na mfano rahisi wa kosmolojia. Ni jukwaa linalodhibitiwa la kupima mawazo ya muda wa kimahusiano — si suluhisho la tatizo la muda, si dai kuhusu Ulimwengu halisi, na si ushahidi kwamba muda “kwa kweli” ni entropia.

Ukaguzi bila chumvi

Makala inaonyesha nini: Katika mfumo mmoja uliotengwa vizuri wa atomi baridi, saa ya ndani inayofafanuliwa kutoka ubadilishanaji wa entropia inaweza kupanga kwa mwelekeo mmoja mienendo inayotazamwa, na mlinganyo wenye ufanisi wa “muda wa entropia” huzalisha upya mageuzi yaliyopimwa katika hali ya kizuizi cha chini iliyochunguzwa.

Ni nini kinawezekana lakini hakijaonyeshwa: Kwamba muda wa entropia au wa kimahusiano ni maelezo mazuri ya muda katika mvuto wa kwanza halisi. Jaribio linaendana na kuchukulia ujenzi kama huo kwa uzito; halithibitishi kwamba asili inafanya hivyo.

Haionyeshi nini: Kwamba tatizo la muda limetatuliwa; kwamba mvuto wa kwanza umetatuliwa; kwamba Ulimwengu ulianza kwa big bang ya aina hii; kwamba anga-wakati hujitokeza kutoka atomi; au kwamba “muda haupo.”

Mapungufu makuu: Jukwaa moja, mwandishi mmoja na chaguo moja la saa; takriban 5% ya kutokuwa na uhakika kwa kila nukta; makadirio ya uga-wastani na msongamano uliowastanisha; na zaidi ya yote, utegemezi wa analogia kati ya kondensati iliyofungwa na mfano rahisi wa kosmolojia.

Msomaji wa kawaida anapaswa kuwa na imani kiasi gani? Imani kubwa kwamba jaribio lilifanya kile linachoripoti katika mfumo wake mwenyewe. Imani ndogo kwa hatua yoyote kutoka analogia hii hadi madai kuhusu muda katika Ulimwengu halisi.

Vyanzo

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