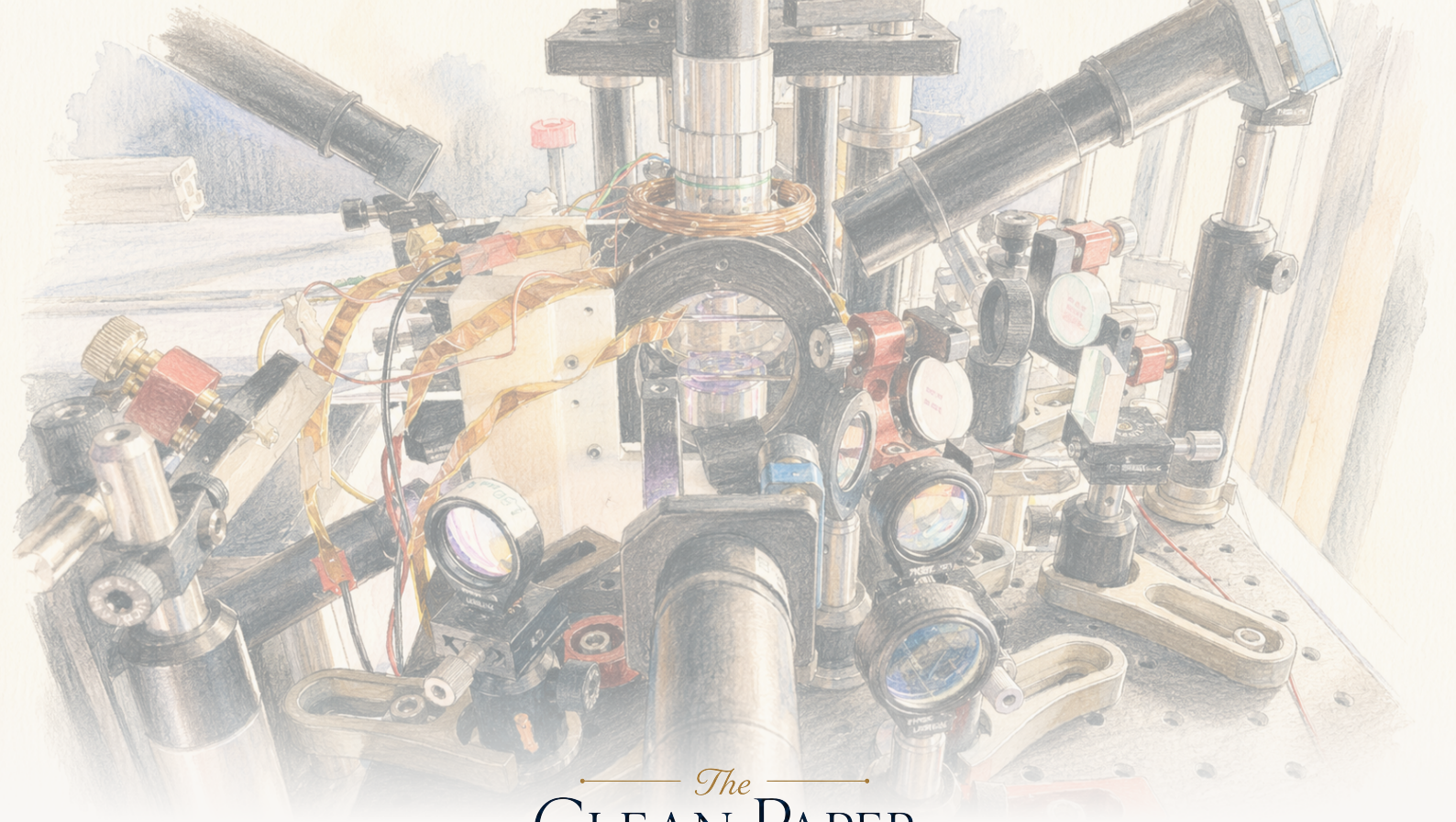

The Clean Paper

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

Egy hidegatom-kísérlet a kvantumgravitáció „idő problémáját” teszteli — laboratóriumi analógként, nem válaszként

A kanonikus kvantumgravitációban a Wheeler–DeWitt-egyenletnek nincs külső órája az események sorrendbe rendezésére: ez az „idő problémája”. Egy egyetlen szerző által végzett kísérlet izolál egy Bose–Einstein-kondenzátumot, vékony optikai gáttal megfigyelt és nem megfigyelt szektorra osztja, majd a közöttük áramló entrópiából belső órát épít. Ez az „entrópikus idő” sorrendbe rendezi a megfigyelt szektor tágulását és újraösszeomlását, és a vizsgált alacsony gátas esetben egy effektív egyenlet reprodukálja a mért adatokat. Kontrollált tesztpad a relációs idő elképzeléseihez: az „ősrobbanás”, „nagy reccs” és „miniuniverzum” egy csapdába zárt gáz analóg címkéi, nem valódi kozmológia, és a munka nem állítja, hogy megoldotta volna az idő problémáját vagy a kvantumgravitációt.

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

Entrópiából épített óra egy csapda belsejében

A kanonikus kvantumgravitációban van egy furcsa és makacs probléma: a központi egyenletben nincs idő. A Wheeler–DeWitt-egyenlet, amely a teljes világegyetemre felírható Schrödinger-egyenlethez áll a legközelebb, egyszerűen azt mondja ki, hogy egy bizonyos operátor az állapotra hatva nullát ad. Nincs külső paraméter, amely „ketyegne”, semmi, ami sorrendbe rakná az „előtte” és „utána” eseményeket — miközben mi nagyon is egyértelműen érzékeljük az idő múlását. Ez az **idő problémája**, amelynek feloldása több mint fél évszázada ellenáll a próbálkozásoknak.

Egy egyetlen szerző által jegyzett, a *Physical Review Research* folyóiratban megjelent tanulmány ezt nem oldja meg. Valami csendesebbet és a maga módján hasznosabbat tesz: létrehoz egy kicsi, jól kontrollált laboratóriumi rendszert, amelyben a javasolt válaszok egyik családja **valódi adatokon tesztelhető**. Giovanni Barontini, a Birminghami Egyetem kutatója egy Bose–Einstein-kondenzátumot — ultrahideg atomok felhőjét, amely egyetlen kvantumobjektumként viselkedik — alakít analóggá, amelyen a „belső”, relációs idő gondolata vitatkozás helyett mérhető. A trükk az, hogy az órát nem külső stopperből, hanem abból az entrópiából építi fel, amelyet a rendszer saját belsejében mozgat.

A „kontrollált analógja az idő problémájának” és a „fizikusok megoldották az időt” közötti távolság itt az egész történet — és ez nagy távolság.

Mit tett a kutató?

A berendezés körülbelül **24 000 rubídium-87 atomból** álló kondenzátum, amelyet konzervatív optikai dipólcsapdában tartanak, majd rezgésbe hoznak — az egész atomfelhő ide-oda leng a csapdán keresztül. Egy **vékony optikai gát** — körülbelül 8 mikrométer széles, 675 nm-es fénnyel, digitális mikrotükör-eszköz segítségével „felfestve” — két félre osztja a csapdát. Az egyik felet megfigyelik (a „**fényes szektor**”), a másikat nem (a „**sötét szektor**”). A kísérlet nagyjából 100 milliszekundumos időablakában a rendszer nem mutat mérhető részecskevesztést vagy disszipációt, így jó közelítéssel zárt rendszer, amelynek Hamilton-operátora maga nem függ az időtől.

[figure_pair pending]

Balra a magneto-optikai csapda hozza létre a hideg rubídiumatom-felhőt az üvegcellában: ez a kondenzátum előkészítéséhez vezető hűtés egyik korai szakasza. Jobbra Giovanni Barontini áll az optikai berendezés mellett. Ezek a kísérlet mögött álló laboratóriumi rendszer fényképei, nem egy szó szerinti miniatűr univerzum képei.

Közönséges laboratóriumi órával figyelve — 2 milliszekundumonként készített abszorpciós képpel — a fényes szektor szemléletes dolgot művel. Atomok áramlanak át a gáton, a szektor a semmiből növekedni kezd (Barontini ezt a pillanatot „**ősrobbanásnak**” nevezi), eléri maximális kiterjedését, majd összehúzódik és visszaürül a sötét oldalra (a „**nagy reccs**”). A gát magasságától függően ez ciklikusan ismétlődhet.

Ezután jön a valódi lényeg. A laboratóriumi óra *külső* a rendszerhez képest — pontosan olyan dolog, amelyet a Wheeler–DeWitt-felállás nem enged meg. Barontini ezért azt kérdezi: lehet-e a

fényes szektor történetét **kizárólag a rendszeren belüli mennyiségekkel sorrendbe rendezni**? Válasza egy óra, amelyet **entrópikus időnek** nevez, és amely ugyanazokból a képekből három egyszerű lépésben olvasható ki. Először minden abszorpciós képből négy számot nyer ki a fényes szektorra: az atomszámot, a sűrűségprofil tömegközéppontját (amely egy analóg „skalármező" szerepét tölti be), a szélességet és az entrópiát — vagyis az egy atomra jutó, standard módszerrel kapott entrópiát megszorozva az atomszámmal. Másodszor, ahogy az atomok áthaladnak a gáton, ez az entrópia emelkedik és csökken. Harmadszor az óra a mért tömegközéppont-pálya mentén követi az entrópiagradienst, minden elmozdulás nagyságát számolva, nem az irányát. Amikor az entrópia és a tömegközéppont együtt nő vagy csökken, minden lépés előreviszi az órát akkor is, amikor a felhő megfordul. Az adatokban ez szinte mindenütt egyetlen sorrendet ad a szektor „ősrobbanásától" a „nagy reccsig", mindössze néhány kis hullámzással ott, ahol a ritkább mintavételezés miatt a két változás nem ért egyet.

Végül levezet egy effektív **„entrópikus idejű Schrödinger-egyenletet"** — a fényes szektor evolúciós egyenletét, amelyet a külső idő helyett e belső óra szerint ír fel —, és numerikusan megoldja, hogy lássa, reprodukálja-e azt, amit a kamera ténylegesen rögzített.

Mit talált?

Három eredményt, növekvő ambíció szerint.

- **A belső óra működik sorrendezésként.** Az entrópikus idő szinte mindenütt monoton nő, sebességét pedig az határozza meg, milyen gyorsan áramlik entrópia a gáton keresztül: gyorsabban jár, amikor entrópia cserélődik, és **teljesen megáll, amikor nincs entrópiacsere**. A reverzibilis, alacsony gátas tartományban *egyáltalán nem telik belső idő* egy nagy reccs és a következő ősrobbanás között — mert ott nem cserélődik entrópia —, miközben a laboratóriumi óra tovább ketyeg. A teljes adathalmazban a két szektor együttes teljes entrópiája a hibahatáron belül állandó maradt, ahogyan egy zárt rendszertől várható.
- **Különböző tartományok különböző „időket" adnak.** Ha megemelik a gátat, az entrópiacsere csökken, így a belső óra lassabban jár. Amikor a két szektor már alig kommunikál, a fényes szektor a tanulmány által „**hőhalálnak**" nevezett állapot felé tart: stacionárius állapotba kerül, amelyben az entrópikus idő egyszerűen megáll.
- **Egy effektív egyenlet reprodukálja az adatokat.** Az entrópikus idejű Schrödinger-egyenletbe behelyettesítve a kísérleti paramétereket numerikusan visszakapható a felhő szélességének mért evolúciója; a tanulmány kiváló egyezést közöl az alacsony gátas esetre (ahol az entrópia által hajtott tag dominál), és az explicit numerikus összehasonlítást erre az esetre végzi el.

> **Mi az „idő problémája", és mi itt az „entrópikus idő"?**
>
> **Az idő problémája** abból fakad, hogy a kanonikus kvantumgravitáció főegyenlete (Wheeler–DeWitt) nem tartalmaz külső időváltozót. Gyakori válasz a *relációs* megközelítés: a rendszeren belüli valamelyik fizikai mennyiséget „órává" tesszük, és minden mást hozzá viszonyítva írunk

le. Visszatérő nehézség, hogy a természetes óraválasztások nem mindig monotonok — egy újra összeomló rendszerben a jelölt óra előrefelé, majd visszafelé járhat —, ezért nem tud tisztán egyetlen irányt kijelölni a kezdet és a vég között.
Az **entrópikus idő** Barontini megoldása erre. Pozíciószerű változó kiolvasása helyett a megfigyelt és nem megfigyelt szektor között cserélődő *entrópiából* épít órát, méghozzá úgy, hogy az ne forduljon vissza. Szellemében közel áll a régebbi „termikus idő" elképzelésekhez, de itt absztrakt matematikai szerkezet helyett működés közben, mérhető entrópiaáramból definiálják — és pontosan ez teszi valódi berendezésen tesztelhetővé.
Lényeges, hogy a kozmológiai szavak — „ősrobbanás", „nagy reccs", „skálatényező", „skalármező", „miniuniverzum" — **analóg címkék**. Egy csapdába zárt atomgáz olyan jellemzőit nevezik meg, amelyek *szerkezetileg hasonlóak* leegyszerűsített kozmológiai modellek egyenleteihez. Nem a valódi világegyetemre vonatkozó állítások.

Mit nem bizonyít ez?

Itt kell a legóvatosabbnak lenni, mert a szókincs könnyen túlhajtja az értelmezést.

- **Nem oldja meg az idő problémáját, és nem is állítja, hogy megoldja.** A tanulmány saját megfogalmazása szerint „kontrollált kísérleti környezetet hoz létre, amelyben a relációs idő konstrukciói kvantitatívan tesztelhetők". A tesztpad nem tétel. Az, hogy a relációs vagy entrópikus idő a kvantumgravitációban az idő *helyes* leírása-e, pontosan ugyanúgy nyitott kérdés marad, mint korábban.
- **Ez analóg, nem a világegyetem.** Nem kozmológiát figyelnek meg. Egy csapdában levő Bose–Einstein-kondenzátumot figyelnek meg, amelynek redukált leírása *matematikailag hasonló* egy leegyszerűsített („minisuperspace") kozmológiai modellhez. A hasonlóság a kísérlet lényege; egyben ez a határa is. Semmi sem mutatja itt, hogy a korai univerzumnak ilyen ősrobbanása volt, hogy a téridő atomokból állna, vagy hogy „az idő nem létezik".
- **Nem mutatja meg, hogy az idő „valójában" entrópia.** Az entrópikus óra egy mesterségesen felépített sorrendezés, amely jól működik ebben a rendszerben. A tanulmány fogalmi rokonságot említ a termikus idő hipotézisével, de kifejezetten nyitva hagyja még azt is, hogy a kettő egybeesik-e. Az, hogy „entrópiából épített belső óra sorrendbe tudja rendezni ezt a kísérletet", sokkal szűkebb állítás annál, hogy „az idő entrópia".
- **Az effektív egyenlet modellezési eredmény, nem a kvantummechanika újraírása.** A levezetett entrópikus idejű Schrödinger-egyenlet lassú entrópiaáram esetén a közönséges kvantummechanikára redukálódik, és szigorúan csak akkor a szokásos unitér elmélet, amikor egyáltalán nincs entrópiaáram. A tanulmány a standard egyenletnél általánosabbként *kifejezetten olyan esetben* pozicionálja, amikor egy megfigyelt rendszer termodinamikailag nyitott egy nem megfigyelt rendszer felé — ez ilyen alrendszerekre vonatkozó állítás, nem annak kijelentése, hogy az alapvető fizikát szükségképpen így kell átírni.
- **Egy kísérlet, egy szerző, egy óraválasztás.** Az eredmények pontonként nagyjából 5%-os statisztikai bizonytalanságot hordoznak, és átlagtér-, valamint átlagolt sűrűségközelítésekre

támaszkodnak. A választott óra és a durvaszemcsézés tudatos modellezési döntések, amelyeket más csoportoknak is érdemes lesz megvizsgálniuk, mielőtt szerkezeti következtetéseket vonunk le.

Mennyire erős a bizonyíték?

Arra a szerény állításra, amelyet ténylegesen megfogalmaz, a bizonyíték tiszta. A rendszer a releváns időskálán valóban jól izolált, az entrópiakönyvelés záródik (a teljes entrópia a hibán belül állandó), a belső óra szinte mindenütt monoton sorrendbe rendezi az adatokat, és egy, a szerző által ugyanebből a modellből, az adatokból becsült paraméterekkel levezetett effektív egyenlet reprodukálja a mért dinamikát az alkalmazott alacsony gátas esetben. Az adatok nyilvánosan hozzáférhetők. Ez valódi mérés valódi, szabályozható rendszeren, nem gondolatkísérlet.

A teher, amelyet elbír, ennek megfelelően szerény. Minden azon az analógián nyugszik, amely a redukált kondenzátummodellt a minisuperspace kozmológiához köti, és az analógiák megvilágítanak, de nem bizonyítanak. Egyetlen platform, egyetlen szerzővel, amely megmutatja, hogy egy belsőidő-recept működik, erős elvi bizonyítás és gyenge alap bármilyen, a természetben működő időre vonatkozó állításhoz. A helyes olvasat: ezt a módszert most már *meg lehet csinálni* laborban — és ellenőrizni lehet.

Miért fontos?

Az idő problémájáról szóló viták régóta a formalizmus szintjén rekedtek, ahol a versengő javaslatokat nehéz cáfolni, mert kevés konkrét, mérhető előrejelzést tesznek. Ha ennek a vitának akár egy sarkát futtatható kísérletté alakítjuk — ahol egy belső óra vagy sorrendbe rendezi az adatokat, vagy nem; ahol egy effektív egyenlet vagy illeszkedik, vagy nem —, megváltozik az érvelés természete. Az elméleti fizikusok padot kapnak, amelyen kipróbálhatják eszközeiket.

Ez a valódi hozzájárulás: nem válasz az időről, hanem **egy hely, ahol kvantitatívan fel lehet tenni a kérdést**. A hidegatom-platformok már szolgáltak kontrollálható analógként Hawking-sugárzáshoz, táguló univerzumokhoz és hamisvákuum-bomláshoz; ez a relációs időt és az idő nyilát adja hozzá az eszköztárhoz. Értéke a lehetővé tett folytatásokban rejlik — más óraválasztásokban, visszapattanó és szinguláris viselkedés összehasonlításában, a reverzibilitás tesztjeiben —, amelyek most már mind mérésként, nem csupán számításként fogalmazhatók meg.

Röviden

Egy fizikus Bose–Einstein-kondenzátumot épített, vékony optikai gáttal megfigyelt és nem megfigyelt félre osztotta, majd a két fél között áramló entrópiából belső „entrópikus időt” szerkesztett. Ez az

óra sorrendbe rendezi a megfigyelt fél tágulási és újraösszeomlási ciklusát, gyorsan jár, amikor entrópia cserélődik, és megáll, amikor nem; a vizsgált alacsony gátas esetben egy ebben a belső időben felírt effektív egyenlet reprodukálja a mért adatokat. A felállás a kanonikus kvantumgravitáció „idő problémájának” analógja: az „ősrobbanás”, „nagy reccs” és „miniuniverzum” egy csapdába zárt gáz címkéi, amely matematikailag hasonlít egy leegyszerűsített kozmológiai modellhez. Kontrollált tesztpad a relációs idő elképzeléseihez — nem az idő problémájának megoldása, nem állítás a valódi világegyetemről, és nem bizonyíték arra, hogy az idő „valójában” entrópia.

Tárgyilagos mérleg

Mit mutat a tanulmány: Egy jól izolált hidegatom-rendszerben az entrópiacseréből definiált belső óra monoton sorrendbe tudja rendezni a megfigyelt dinamikát, és egy effektív „entrópikus idejű” egyenlet reprodukálja a mért evolúciót a vizsgált alacsony gátas esetben.

Mi hihető, de nem mutatták meg: Hogy az entrópikus vagy relációs idő jól írja le az időt a valódi kvantumgravitációban. A kísérlet indokolttá teszi az ilyen konstrukciók komolyan vételét; nem igazolja őket a természetre.

Mit nem mutat: Hogy az idő problémája megoldódott; hogy a kvantumgravitáció megoldódott; hogy a világegyetem ilyen típusú ősrobbanással kezdődött; hogy a téridő atomokból emergál; vagy hogy „az idő nem létezik”.

Fő korlátok: Egyetlen platform, egyetlen szerző és egyetlen óraválasztás; pontonként nagyjából 5%-os bizonytalanság; átlagtér- és átlagoltsűrűség-közelítések; mindenekelőtt pedig egy csapdába zárt kondenzátum és egy leegyszerűsített kozmológiai modell közötti analógiára támaszkodik.

Mennyi bizalma legyen egy általános olvasónak? Nagy abban, hogy a kísérlet saját rendszerében azt tette, amit közöl. Alacsony bármilyen olyan ugrással kapcsolatban, amely ebből az analógból a valódi univerzum idejére vonatkozó állítást csinál.

Források

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