



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 „ős-robbanás”, „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 fénnel, 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 recsig”, mindössze néhány kis hullámmal 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 recsig 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 durvaszemcsés 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 gondolat kísérlet.

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 analóggént Hawking-sugárzáshoz, táguló univerzumokhoz és hamisvákuum-bomláshoz; ez a relációs időt és az idő nyílát adja hozzá az eszköztárhoz. Értéke a lehetővé tett folytatásokban rejlik — más óraválasztásokban, visszapattanó és szinguláris viselkedés összehasonlításában, a reverzibilitás tesztjeiben —, amelyek most már mind mérésenként, 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 felállítás a kanonikus kvantumgravitáció „idő problémájának” analógja: az „ősrobbanás”, „nagy recs” és „miniuniverzum” egy csapdába zárt gáz címkéi, amely matematikailag hasonlít egy leegyszerűsített kozmológiai modellhez. Kontrollált teszt-pad a relációs idő elképzeléseivel — 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 „entrópiikus idejű” egyenlet reprodukálja a mért evolúciót a vizsgált alacsony gátas esetben.

Mi hihető, de nem mutatták meg: Hogy az entrópiikus vagy relációs idő jól írja le az időt a valódi kvantumgravitációban. A kísérlet indokoltá 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>