The
CLEAN PAPER

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

Ett experiment med kalla atomer prövar kvantgravitationens ”tidsproblem” — som laboratorieanalog, inte som svar

I kanonisk kvantgravitation saknar Wheeler–DeWitt-ekvationen en extern klocka som ordnar händelser: det så kallade tidsproblemet. Ett experiment med en enda författare isolerar ett Bose–Einstein-kondensat, delar det med en tunn optisk barriär i en oobserverad och en observerad sektor och bygger en intern klocka av entropin som flödar mellan dem. Denna ”entropiska tid” ordnar den observerade sektorns expansion och återkollaps, och en effektiv ekvation återger uppmätta data i det undersökta fallet med låg barriär. Det är en kontrollerad testbädd för idéer om relationell tid: ”big bang”, ”big crunch” och ”miniatyruniversum” är analoga etiketter för en instängd gas, inte verklig kosmologi, och arbetet gör inte anspråk på att lösa tidsproblemet eller kvantgravitationen.

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

En klocka byggd av entropi, inuti en fälla

Inom kanonisk kvantgravitation finns ett märkligt och envist problem: den centrala ekvationen innehåller ingen tid. Wheeler–DeWitt-ekvationen, det närmaste man kommer en Schrödingerekvation för hela universum, säger helt enkelt att en viss operator som verkar på tillståndet ger noll. Det finns ingen extern parameter som tickar, ingenting som ordnar ”före” och ”efter” — trots att vi uppenbart upplever att tiden går. Detta är **tidsproblemet**, och det har stått emot en lösning i mer än ett halvt sekel.

En artikel med en enda författare i *Physical Review Research* löser det inte. Den gör något mer lågmält och på sitt sätt mer användbart: den bygger ett litet, välkontrollerat laboratoriesystem där en familj av föreslagna svar kan **prövas mot verkliga data**. Giovanni Barontini vid University of Birmingham tar ett Bose–Einstein-kondensat — ett moln av ultrakalla atomer som beter sig som ett enda kvantobjekt — och gör det till en analog där idén om en ”intern”, relationell tid kan mätas i stället för att bara diskuteras. Tricket är att bygga en klocka inte av ett yttre stoppur, utan av den entropi som systemet flyttar runt inom sig självt.

Avståndet mellan ”en kontrollerad analog till tidsproblemet” och ”fysiker har löst tiden” är hela berättelsen här, och det är långt.

Vad forskaren gjorde

Apparaten består av ett kondensat med omkring **24 000 rubidium-87-atomer**, hållet i en konservativ optisk dipolfälla och satt i svängning — hela atommolnet rör sig fram och tillbaka genom fällan. En **tunn optisk barriär** — ungefär 8 mikrometer bred, skapad med 675 nm-ljus via en digital mikrospegelenhet — delar fällan i två halvor. Den ena övervakas, den ”**ljusa sektorn**”; den andra gör det inte, den ”**mörka sektorn**”. Under experimentets ungefär 100 millisekunder långa tidsfönster visar systemet ingen mätbar partikelförlust eller dissipation. Det är därför, med god approximation, ett slutet system med en Hamiltonoperator som inte själv beror på tiden.

[figure_pair pending]

Till vänster producerar den magneto-optiska fällan det kalla molnet av rubidiumatomer i glascellen: ett tidigt kylningssteg på vägen mot kondensatet. Till höger står Giovanni Barontini bredvid den optiska apparaturen. Detta är fotografier av laboratoriesystemet bakom experimentet, inte bilder av ett bokstavligt miniatyruniversum.

Betraktad med en vanlig laboratorieklocka — en absorptionsbild varannan millisekund — gör den ljusa sektorn något suggestivt. Atomer strömmar över barriären och sektorn växer från ingenting — Barontini kallar ögonblicket ”**big bang**” — når sin största utsträckning, drar sedan ihop sig och töms tillbaka till den mörka sidan, en ”**big crunch**”. Beroende på barriärens höjd kan detta upprepas cykliskt.

Sedan kommer den egentliga poängen. Laboratorieklockan är *extern* i förhållande till systemet — precis den typ av sak som Wheeler–DeWitt-situationen inte tillåter. Barontini frågar därför: kan den

ljusa sektorns historia **ordnas med enbart storheter som är interna för systemet**? Hans svar är en klocka som han kallar **entropisk tid**, avläst direkt ur samma bilder i tre enkla steg. Först hämtar han fyra tal för den ljusa sektorn från varje absorptionsbild: atomantalet, masscentrum för densitetsprofilen — som spelar rollen av ett analogt ”skalärfält” — bredden och entropin, alltså entropin per atom beräknad med en standardmetod multiplicerad med atomantalet. För det andra stiger och faller entropin när atomer passerar barriären. För det tredje följer klockan entropigradienten längs masscentrums uppmätta bana och räknar storleken på varje förflyttning, inte dess riktning. När entropin och masscentrum stiger eller faller tillsammans för klockan varje steg framåt även när molnet vänder. I data ger detta nästan överallt en enda ordning från sektorns ”big bang” till dess ”big crunch”, med bara några små svängningar där den grova samplingen får de två förändringarna att peka åt olika håll.

Till sist härleder han en effektiv **”Schrödingerekvation i entropisk tid”** — en utvecklingsekvation för den ljusa sektorn skriven med denna interna klocka i stället för den externa — och löser den numeriskt för att se om den återger det kameran faktiskt registrerade.

Vad de fann

Tre resultat, i stigande ambitionsordning.

- **Den interna klockan fungerar som en ordning.** Den entropiska tiden växer monotont nästan överallt, och hastigheten bestäms av hur snabbt entropi passerar barriären: den går fortare när entropi utbyts och **stannar helt när inget utbyte sker**. I det reversibla området med låg barriär passerar *ingen intern tid alls* mellan en big crunch och nästa big bang — eftersom ingen entropi utbyts där — trots att laboratorieklockan fortsätter ticka. Över hela datamängden förblev den sammanlagda entropin i båda sektorerna konstant inom felmarginalerna, som ett slutet system kräver.
- **Olika regimer ger olika ”tider”.** Höj barriären och entropiutbytet minskar, så den interna klockan går långsammare. När barriären blir så hög att sektorerna knappt kommunicerar går den ljusa sektorn mot det som artikeln kallar en ”**värmedöd**”: ett stationärt tillstånd där den entropiska tiden helt enkelt upphör.
- **En effektiv ekvation återger data.** Schrödingerekvationen i entropisk tid, matad med experimentparametrarna, återskapar numeriskt den uppmätta utvecklingen av molnets bredd. Artikeln rapporterar mycket god överensstämmelse för fallet med låg barriär — där den entropidrivna termen dominerar — och den explicita numeriska jämförelsen görs för just detta fall.

> **Vad ”tidsproblemet” och ”entropisk tid” betyder här**
>
> **Tidsproblemet** är att den kanoniska kvantgravitationens huvudekvation, Wheeler–DeWitt-ekvationen, saknar en extern tidsvariabel. Ett vanligt svar är *relationellt*: gör en fysisk storhet inne i systemet till ”klocka” och beskriv allt annat i förhållande till den. En återkommande svårighet är att naturliga klockval inte alltid är monotona — i ett system som kollapsar tillbaka

> går kandidatklockan först framåt och sedan bakåt — och därför inte entydigt kan märka en riktning från början till slut.
> **Entropisk tid** är Barontinis väg runt detta. I stället för att läsa av en positionsliknande variabel bygger han klockan av den *entropi* som utbyts mellan den observerade och den oobserverade sektorn, konstruerad så att den inte vänder. Idén ligger nära äldre tankar om ”termisk tid”, men definieras här operationellt från ett mätbart entropiflöde i stället för från en abstrakt matematisk struktur — och det är just detta som gör den möjlig att pröva i en verklig apparat.
> Avgörande är att de kosmologiska orden — ”big bang”, ”big crunch”, ”skalfaktor”, ”skalärfält”, ”miniatyruniversum” — är **analoga etiketter**. De betecknar egenskaper hos en instängd atomgas som råkar vara *strukturellt lika* ekvationerna i förenklade kosmologiska modeller. De är inte påståenden om det verkliga universum.

Vad detta inte bevisar

Här är försiktighet särskilt viktig, eftersom ordförrådet inbjuder till överdrifter.

- **Det löser inte tidsproblemet och påstår inte att det gör det.** Artikelns egen formulering är att arbetet ”etablerar en kontrollerad experimentell miljö där relationella tidskonstruktioner kan prövas kvantitativt”. En testbädd är inte ett teorem. Huruvida relationell eller entropisk tid är den *rätta* beskrivningen av tid i kvantgravitation lämnas lika öppet som tidigare.
- **Det är en analog, inte universum.** Ingen kosmologi observeras. Det som observeras är ett Bose–Einstein-kondensat i en fälla, vars reducerade beskrivning är *matematiskt lik* en förenklad kosmologisk modell, ett så kallat minirymdsrum. Likheten är experimentets poäng och samtidigt dess gräns. Inget här visar att det tidiga universum hade en big bang av detta slag, att rumtiden består av atomer eller att ”tiden inte finns”.
- **Det visar inte att tiden ”egentligen” är entropi.** Den entropiska klockan är en konstruerad ordning som fungerar väl i detta system. Artikeln noterar en begreppslig släktskap med hypotesen om termisk tid men lämnar uttryckligen öppet om de ens sammanfaller. ”En intern klocka byggd av entropi kan ordna detta experiment” är ett mycket snävare påstående än ”tid är entropi”.
- **Den effektiva ekvationen är ett modelleringsresultat, inte en omskrivning av kvantmekaniken.** Den härledda Schrödingerekvationen i entropisk tid går över i vanlig kvantmekanik när entropiflödet är långsamt och är strikt identisk med den vanliga unitära teorin endast när ingen entropi alls flödar. Artikeln presenterar den som mer allmän än standardekvationen *specifikt när ett observerat system är termodynamiskt öppet mot ett oobserverat* — ett påstående om öppna delsystem i denna typ av uppställning, inte om att den fundamentala fysiken måste skrivas om på detta sätt.
- **Det är ett experiment, en författare och ett klockval.** Resultaten har ungefär 5 procents statistisk osäkerhet per datapunkt och bygger på medelfälts- och medeldensitetsapproximationer. Den valda klockan och grovkornigheten är avsiktliga modellbeslut som andra grupper kommer att vilja pröva innan strukturella slutsatser dras.

Hur starka är beläggen

För det begränsade påstående som faktiskt görs är beläggen tydliga. Systemet är genuint välisolerat på den relevanta tidsskalan, entropibokföringen går ihop — den totala entropin är konstant inom felmarginalerna — den interna klockan ordnar data monotont nästan överallt, och en effektiv ekvation som författaren härlett ur samma modell med parametrar uppskattade från data återger den uppmätta dynamiken för det fall med låg barriär där den användes. Data är öppet tillgängliga. Detta är en verklig mätning av ett verkligt och styrbart system, inte ett tankeexperiment.

Den vikt slutsatsen kan bära är i motsvarande grad begränsad. Allt vilar på analogin mellan den reducerade kondensatmodellen och kosmologi i minirymdsrum, och analogier kan belysa utan att bevisa. Att en enda plattform, från en enda författare, visar att ett recept för intern tid fungerar är ett starkt principbevis och en svag grund för påståenden om hur tid beter sig i naturen. Rätt läsning är: metoden är nu något man kan *göra* i ett laboratorium och kontrollera.

Varför det spelar roll

Diskussionen om tidsproblemet har länge fastnat på formalismens nivå, där konkurrerande förslag är svåra att falsifiera eftersom de ger få konkreta och mätbara förutsägelser. Att göra ens ett hörn av debatten till ett experiment som kan köras — där en intern klocka antingen ordnar data eller inte och en effektiv ekvation antingen passar eller inte — förändrar argumentets karaktär. Det ger teoretiker en laboratoriebänk att pröva sina verktyg på.

Det är det verkliga bidraget: inte ett svar om tiden, utan en **plats där frågan kan ställas kvantitativt**. Plattformar med kalla atomer har redan fungerat som styrbara analoger för Hawkingstrålning, expanderande universum och falskt vakuums sönderfall; detta lägger relationell tid och tidens pil till verktygslådan. Värdet ligger i de uppföljningar som blir möjliga — andra klockval, studsande kontra singulärt beteende och test av reversibilitet — nu som mätningar i stället för enbart beräkningar.

Kort sammanfattning

En fysiker byggde ett Bose–Einstein-kondensat, delade det med en tunn optisk barriär i en observerad och en oobserverad halva och använde entropin som flödade mellan halvorna för att konstruera en intern ”entropisk tid”. Klockan ordnar den observerade halvans expansions- och återkollapscykel, går snabbt när entropi utbyts och stannar när inget utbyte sker. En effektiv ekvation skriven i denna interna tid återger uppmätta data i det fall med låg barriär som författaren undersökte. Uppställningen är en analog till ”tidsproblemet” i kanonisk kvantgravitation: ”big bang”, ”big crunch” och ”miniatyruniversum” är etiketter för en instängd gas som är matematiskt lik en förenklad kosmologisk modell. Det är en kontrollerad testbädd för idéer om relationell tid — inte en lösning på tidsproblemet, inte ett påstående om det verkliga universum och inte belägg för att tid ”egentligen” är entropi.

Rakt på sak

Vad artikeln visar: I ett välisolerat system med kalla atomer kan en intern klocka definierad genom entropiutbyte ordna den observerade dynamiken monotont, och en effektiv ekvation i ”entropisk tid” återger den uppmätta utvecklingen i det undersökta fallet med låg barriär.

Vad som är rimligt men inte visat: Att entropisk eller relationell tid är en god beskrivning av tid i verklig kvantgravitation. Experimentet är förenligt med att sådana konstruktioner tas på allvar; det bekräftar dem inte för naturen.

Vad den inte visar: Att tidsproblemet är löst; att kvantgravitationen är löst; att universum började med en big bang av detta slag; att rumtiden framträder ur atomer; eller att ”tiden inte finns”.

Viktigaste begränsningarna: En enda plattform, en enda författare och ett enda klockval; omkring 5 procents osäkerhet per datapunkt; medelfälts- och medeldensitetsapproximationer; och framför allt beroendet av en analogi mellan ett instängt kondensat och en förenklad kosmologisk modell.

Hur stor tillit bör en allmän läsare ha? Hög tillit till att experimentet gjorde det som rapporteras i sitt eget system. Låg tillit till varje språng från denna analog till påståenden om tid i det verkliga universum.

Källor

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