The Clean Paper

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

Et kaldatom-eksperiment tester kvantegravitasjonens «tidsproblem» — som en laboratorieanalogi, ikke et svar

I kanonisk kvantegravitasjon har Wheeler–DeWitt-ligningen ingen ekstern klokke som ordner hendelser: «tidsproblemet». Et eksperiment med én forfatter isolerer et Bose–Einstein-kondensat, deler det med en tynn optisk barriere i en uobservert og en observert sektor og bygger en intern klokke fra entropien som strømmer mellom dem. Denne «entropiske tiden» ordner utvidelsen og sammentrekningen i den observerte sektoren, og en effektiv ligning gjengir de målte dataene i tilfellet med lav barriere som ble undersøkt. Det er en kontrollert testplattform for ideer om relasjonell tid: «big bang», «big crunch» og «miniunivers» er analogibetegnelser for en innestengt gass, ikke virkelig kosmologi, og arbeidet hevder ikke å løse tidsproblemet eller kvantegravitasjonen.

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 klokke bygget av entropi, inne i en felle

I kanonisk kvantegravitasjon finnes et merkelig og gjenstridig problem: Den sentrale ligningen inneholder ingen tid. Wheeler–DeWitt-ligningen, det nærmeste vi kommer en Schrödinger-ligning for hele universet, sier ganske enkelt at en bestemt operator som virker på tilstanden, gir null. Det finnes ingen ytre parameter som tikker, ingenting som ordner «før» og «etter» — og likevel opplever vi åpenbart at tiden går. Dette er **tidsproblemet**, og det har motstått en løsning i mer enn et halvt århundre.

En eneforfatterartikkel i *Physical Review Research* løser det ikke. Det den gjør, er stillere og på sin måte mer nyttig: Den bygger et lite, godt kontrollert laboratoriesystem der én familie av foreslåtte svar kan **prøves mot virkelige data**. Giovanni Barontini ved University of Birmingham tar et Bose–Einstein-kondensat — en sky av ultrakalde atomer som oppfører seg som ett kvanteobjekt — og gjør det til en analog der ideen om en «intern», relasjonell tid kan måles i stedet for bare diskuteres. Trikset er å bygge en klokke, ikke av en ytre stoppeklokke, men av entropien systemet flytter rundt inne i seg selv.

Avstanden mellom «en kontrollert analog av tidsproblemet» og «fysikere har løst tiden» er hele historien her, og den avstanden er lang.

Hva forskeren gjorde

Apparatet består av et kondensat med omtrent **24 000 rubidium-87-atomer** holdt i en konservativ optisk dipolfelle og satt i svingning — hele atomskyen skvulper frem og tilbake gjennom fellen. En **tynn optisk barriere** — omtrent 8 mikrometer bred, tegnet med lys på 675 nm ved hjelp av en digital mikrospeilenhet — deler fellen i to halvdeler. Den ene halvdelen observeres («den **lyse sektoren**»); den andre gjør det ikke («den **mørke sektoren**»). I løpet av forsøksvinduet på omtrent 100 millisekunder viser systemet ikke målbart partikkeltap eller dissipasjon. Det er derfor, med god tilnærming, et lukket system med en Hamilton-operator som ikke selv avhenger av tid.

[figure_pair pending]

Til venstre produserer den magneto-optiske fellen den kalde skyen av rubidiumatomer inne i glasscellen: et tidlig kjøletrinn på veien mot å forberede kondensatet. Til høyre står Giovanni Barontini ved det optiske apparatet. Dette er fotografier av laboratoriesystemet bak forsøket, ikke bilder av et bokstavelig miniatyrunivers.

Sett med en vanlig laboratorieklokke — ett absorpsjonsbilde hvert 2. millisekund — gjør den lyse sektoren noe suggestivt. Atomer strømmer over barrieren, og sektoren vokser fra ingenting, et øyeblikk Barontini kaller «**big bang**». Den når en maksimal utstrekning, trekker seg deretter sammen og tømmes tilbake til den mørke siden, «**big crunch**». Avhengig av hvor høy barrieren er, kan dette gjenta seg syklisk.

Så kommer selve poenget. Laboratorieklokken er *ekstern* til systemet — nettopp den typen klokke Wheeler–DeWitt-rammen ikke tillater. Barontini spør derfor: Kan historien til den lyse sektoren

ordnes bare ved hjelp av størrelser inne i systemet? Svaret hans er en klokke han kaller **entropisk tid**, som leses direkte fra de samme bildene i tre enkle trinn. Først henter han ut fire tall fra hvert absorpsjonsbilde av den lyse sektoren: antall atomer, massesenteret i tetthetsprofilen — som spiller rollen som et analogt «skalarfelt» — bredden og entropien, altså entropien per atom beregnet med en standardmetode og multiplisert med atomtallet. For det andre stiger og faller denne entropien når atomer krysser barrieren. For det tredje følger klokken entropigradienten langs den målte massesenterbanen og teller størrelsen på hver forskyvning, ikke retningen. Når entropi og massesenter stiger eller faller sammen, går klokken frem for hvert trinn, også når skyen snur. I dataene gir dette én sammenhengende ordning fra sektorens «big bang» til dens «big crunch» nesten overalt, med bare noen få små ujevnheter der grov prøvetaking gjør at de to endringene ikke stemmer overens.

Til slutt utleder han en effektiv **«Schrödinger-ligning i entropisk tid»** — en utviklingsligning for den lyse sektoren skrevet med denne interne klokken i stedet for den eksterne — og løser den numerisk for å se om den gjengir det kameraet faktisk registrerte.

Hva han fant

Tre resultater, i stigende ambisjonsnivå.

- **Den interne klokken fungerer som en ordning.** Den entropiske tiden øker monotont nesten overalt, og hastigheten bestemmes av hvor raskt entropi krysser barrieren: Den går raskere når entropi utveksles, og **stopper helt når ingen entropi utveksles**. I det reversible regimet med lav barriere går det *ingen intern tid i det hele tatt* mellom en big crunch og neste big bang — fordi ingen entropi utveksles der — selv om laboratorieklokken fortsetter å tikke. I hele datasettet holdt den samlede entropien i begge sektorene seg konstant innenfor feilmarginene, slik et lukket system krever.
- **Ulike regimer gir ulike «tider».** Når barrieren heves, blir entropiutvekslingen mindre, slik at den interne klokken går langsommere. Når barrieren blir så høy at sektorene nesten ikke kommunisierer, går den lyse sektoren mot det artikkelen kaller en «**varmedød**»: en stasjonær tilstand der den entropiske tiden ganske enkelt stanser.
- **En effektiv ligning gjengir dataene.** Schrödinger-ligningen i entropisk tid, matet med forsøksparametrene, gjenskaper numerisk den målte utviklingen av skyens bredde. Artikkelen rapporterer svært god overensstemmelse i tilfellet med lav barriere, der det entropidrevne leddet dominerer; den eksplisitte numeriske sammenligningen gjøres for dette tilfellet.

> **Hva «tidsproblemet» og «entropisk tid» betyr her**
>
> **Tidsproblemet** er at hovedligningen i kanonisk kvantegravitasjon, Wheeler–DeWitt-ligningen, ikke har noen ekstern tidsvariabel. Et vanlig svar er *relasjonelt*: Man gjør én fysisk størrelse inne i systemet til «klokke» og beskriver alt annet i forhold til den. En tilbakevendende vanskelighet er at naturlige klokkevalg ikke alltid er monotone — i et system som kollapser tilbake, går

> kandidatklokken først fremover og deretter bakover — og kan derfor ikke merke én entydig retning fra start til slutt.
> **Entropisk tid** er Barontinis måte å omgå dette på. I stedet for å lese en posisjonslignende variabel bygger han klokken av *entropien* som utveksles mellom den observerte og den uobserverte sektoren, konstruert slik at den ikke snur. Ideen er beslektet med eldre hypoteser om «termisk tid», men her defineres tiden operasjonelt fra en målbar entropistrøm i stedet for fra abstrakt matematisk struktur — nettopp det som gjør den testbar i et virkelig apparat.
> Det er avgjørende at de kosmologiske ordene — «big bang», «big crunch», «skalafaktor», «skalarfelt», «miniatyrunivers» — er **analoge betegnelser**. De navngir egenskaper ved en innfanget atomgass som tilfeldigvis er *strukturelt lik* ligningene i forenklede kosmologiske modeller. De er ikke utsagn om det faktiske universet.

Hva dette ikke beviser

Her er varsomhet særlig viktig, fordi ordbruken inviterer til overdrivelse.

- **Det løser ikke tidsproblemet og hevder heller ikke å gjøre det.** Artikkelens egen formulering er at den «etablerer en kontrollert eksperimentell ramme der konstruksjoner av relasjonell tid kan testes kvantitativt». En testplattform er ikke et teorem. Om relasjonell eller entropisk tid er den *riktige* beskrivelsen av tid i kvantegravitasjon, står like åpent som før.
- **Det er en analog, ikke universet.** Ingen kosmologi observeres. Det som observeres, er et Bose–Einstein-kondensat i en felle, og den reduserte beskrivelsen er *matematisk lik* en forenklet kosmologisk «minisuperspace»-modell. Likheten er poenget med forsøket; den er også grensen. Ingenting her viser at det tidlige universet hadde et big bang av denne typen, at romtid består av atomer, eller at «tid ikke finnes».
- **Det viser ikke at tid «egentlig» er entropi.** Den entropiske klokken er én konstruert ordning som fungerer godt i dette systemet. Artikkelen peker på et konseptuelt slektskap med hypotesen om termisk tid, men lar uttrykkelig spørsmålet stå åpent om de to engang sammenfaller. «En intern klokke bygget av entropi kan ordne dette forsøket» er en mye smalere påstand enn «tid er entropi».
- **Den effektive ligningen er et modellresultat, ikke en omskriving av kvantemekanikken.** Den utledede Schrödinger-ligningen i entropisk tid går over i vanlig kvantemekanikk når entropistrømmen er langsom, og er strengt den vanlige unitære teorien bare når ingen entropi strømmer. Artikkelen fremstiller den som mer generell enn standardligningen *spesifikt når et observert system er termodynamisk åpent mot et uobservert system* — et utsagn om åpne delsystemer i denne typen oppsett, ikke en påstand om at fundamental fysikk må skrives om på denne måten.
- **Det er ett forsøk, én forfatter og ett klokkevalg.** Resultatene har omtrent 5 prosent statistisk usikkerhet per datapunkt og bygger på middelverdi- og gjennomsnittstetthetstilnærminger. Klokkevalget og grovinndelingen er bevisste modellvalg av den typen andre grupper vil ønske å undersøke før de trekker strukturelle konklusjoner.

Hvor sterke er bevisene?

For den beskjedne påstanden artikkelen faktisk fremmer, er bevisene ryddige. Systemet er virkelig godt isolert på den relevante tidsskalaen, entropiregnskapet går opp — total entropi er konstant innenfor feilmarginene — den interne klokken ordner dataene monotont nesten overalt, og en effektiv ligning, utledet av forfatteren fra den samme modellen med parametere hentet fra dataene, gjengir den målte dynamikken i lavbarrieretilfellet der den ble brukt. Dataene er åpent tilgjengelige. Dette er en reell måling av et virkelig, kontrollerbart system, ikke et tankeeksperiment.

Vekten resultatet kan bære, er tilsvarende beskjeden. Alt hviler på analogien mellom den reduserte kondensatmodellen og minisuperspace-kosmologi, og analogier kan opplyse uten å bevise. At én plattform fra én forfatter viser at én oppskrift på intern tid fungerer, er et sterkt prinsippbevis og et svakt grunnlag for påstander om hvordan tid oppfører seg i naturen. Riktig lesning er: Metoden er nå noe man kan *gjøre* i et laboratorium og kontrollere.

Hvorfor det er viktig

Diskusjoner om tidsproblemet har lenge sittet fast på formalismenivå, der konkurrerende forslag er vanskelige å falsifisere fordi de gir få konkrete, målbare forutsigelser. Å gjøre selv ett hjørne av denne debatten til et forsøk som kan kjøres — der en intern klokke enten ordner dataene eller ikke, og en effektiv ligning enten passer eller ikke — endrer argumentets karakter. Det gir teoretikere en arbeidsbenk der de kan teste verktøyene sine.

Det er det egentlige bidraget: ikke et svar om tid, men et **sted der spørsmålet kan stilles kvantitativt**. Plattformene med kalde atomer har allerede fungert som kontrollerbare analoger for Hawking-stråling, ekspanderende universer og falsk-vakuum-henfall; dette legger relasjonell tid og tidens pil til verktøykassen. Verdien ligger i oppfølgingsforsøkene det muliggjør — andre klokkevalg, sprettende mot singulær oppførsel, tester av reversibilitet — som nå kan bli målinger og ikke bare beregninger.

Kort oppsummert

En fysiker bygget et Bose–Einstein-kondensat, delte det med en tynn optisk barriere i en observert og en uobservert halvdel og brukte entropien som strømmet mellom halvdelene, til å konstruere en intern «entropisk tid». Denne klokken ordner den observerte halvdelens syklus med ekspansjon og tilbakefall, går raskt når entropi utveksles og stopper når det ikke skjer, og en effektiv ligning skrevet i denne interne tiden gjengir de målte dataene i lavbarrieretilfellet forfatteren undersøkte. Oppsettet er en analog av «tidsproblemet» i kanonisk kvantegravitasjon: «big bang», «big crunch» og «miniatyrunivers» er betegnelser på en innfanget gass som matematisk ligner en forenklet kosmologisk modell. Dette er en kontrollert testplattform for ideer om relasjonell tid — ikke en løsning på tidsproblemet, ikke en påstand om det virkelige universet og ikke bevis for at tid «egentlig» er

entropi.

Nøktern vurdering

Hva artikkelen viser: I ett godt isolert system av kalde atomer kan en intern klokke definert fra entropiutveksling ordne den observerte dynamikken monotont, og en effektiv ligning i «entropisk tid» gjengir den målte utviklingen i lavbarrieretilfellet som ble undersøkt.

Hva som er plausibelt, men ikke vist: At entropisk eller relasjonell tid er en god beskrivelse av tid i virkelig kvantegravitasjon. Forsøket er forenlig med at slike konstruksjoner bør tas alvorlig; det bekrefter dem ikke for naturen.

Hva den ikke viser: At tidsproblemet er løst; at kvantegravitasjon er løst; at universet begynte i et big bang av denne typen; at romtid oppstår fra atomer; eller at «tid ikke finnes».

Viktigste begrensninger: Én plattform, én forfatter og ett klokkevalg; omtrent 5 prosent usikkerhet per datapunkt; middelverdi- og gjennomsnittstetthetstilnærminger; og fremfor alt avhengigheten av en analogi mellom et innfanget kondensat og en forenklet kosmologisk modell.

Hvor stor tillit bør en vanlig leser ha? Høy tillit til at forsøket gjorde det det rapporterer i sitt eget system. Lav tillit til ethvert sprang fra denne analogen til påstander om tid i det virkelige universet.

Kilder

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