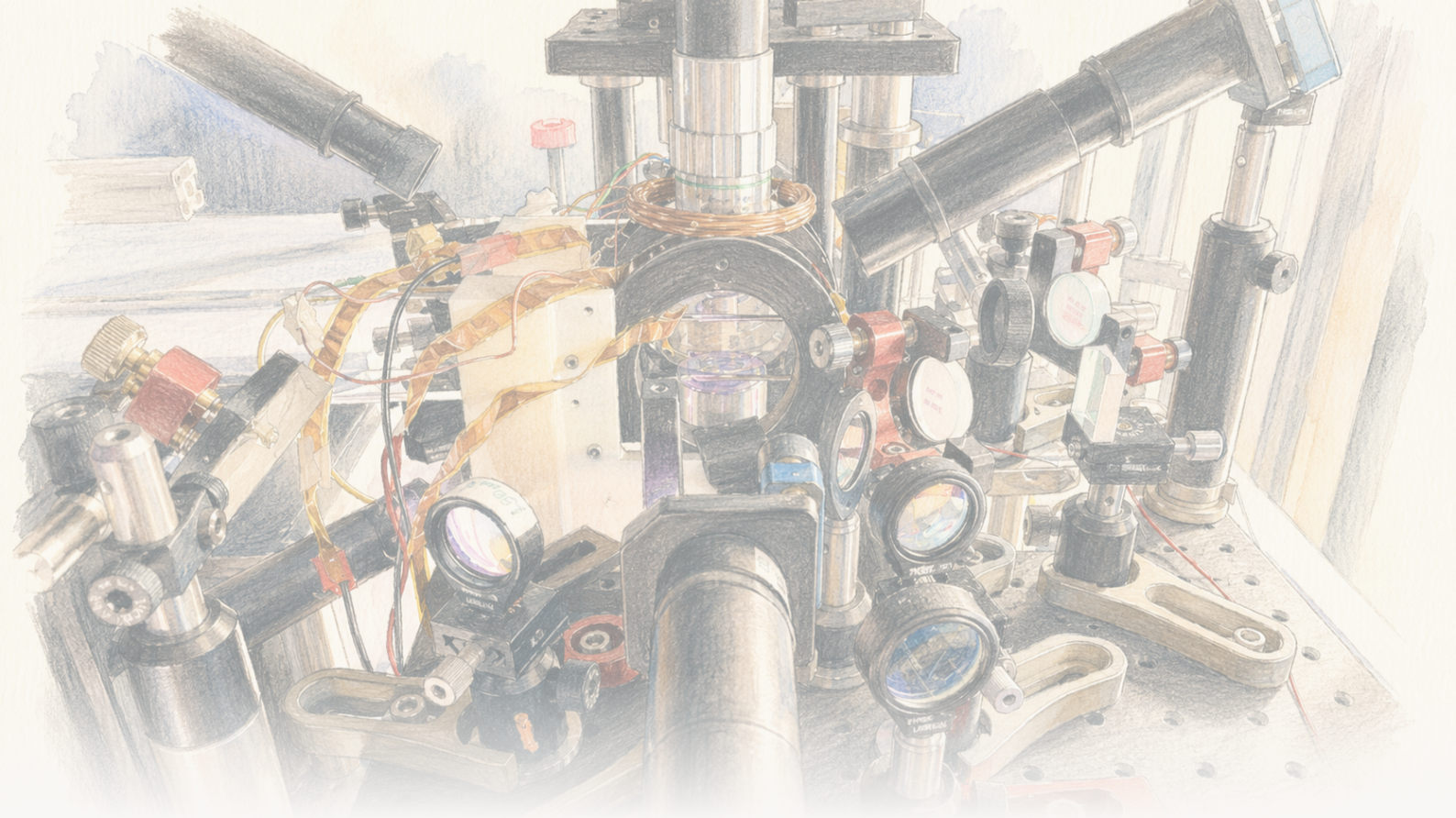

The Clean Paper

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

Et ur bygget af entropi ordnede tiden i et lille analogt univers af kolde atomer

Et Bose–Einstein-kondensat delt af en optisk barriere gav en kontrolleret platform, hvor den entropi, der blev udvekslet mellem en observeret og en uobserveret sektor, fungerede som et internt ur. Uret ordnede den målte dynamik og standsede, når entropiudvekslingen ophørte. Det er en kvantitativ laboratorieanalog for relationel tid — ikke en løsning på tidsproblemet, ikke en model af det virkelige univers og ikke bevis for, at tid er entropi.

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

Et ur bygget af entropi, inde i en fælde

I kanonisk kvantegravitation findes et mærkeligt og genstridigt problem: Den centrale ligning indeholder ingen tid. Wheeler–DeWitt-ligningen, det nærmeste vi kommer en Schrödinger-ligning for hele universet, siger ganske enkelt, at en bestemt operator, der virker på tilstanden, giver nul. Der er ingen ydre parameter, som tikker, intet der ordner »før« og »efter« — og alligevel oplever vi tydeligvis, at tiden går. Dette er **tidsproblemet**, og det har modstået en løsning i mere end et halvt århundrede.

En artikel med én forfatter i *Physical Review Research* løser det ikke. Det, den gør, er mere stilfærdigt og på sin måde mere nyttigt: Den bygger et lille, velkontrolleret laboratoriesystem, hvor én familie af foreslåede svar kan **afprøves mod virkelige data**. Giovanni Barontini ved University of Birmingham tager et Bose–Einstein-kondensat — en sky af ultrakolde atomer, der opfører sig som ét kvanteobjekt — og gør det til en analog, hvor idéen om en »intern«, relationel tid kan måles i stedet for blot at diskuteres. Tricket er at bygge et ur, ikke af et eksternt stopur, men af den entropi, systemet flytter rundt inde i sig selv.

Afstanden mellem »en kontrolleret analog af tidsproblemet« og »fysikere har løst tiden« er hele historien her, og den afstand er stor.

Hvad forskeren gjorde

Apparatet består af et kondensat med omtrent **24.000 rubidium-87-atomer**, der holdes i en konservativ optisk dipolfælde og sættes i svingning — hele atomskyen skvulper frem og tilbage gennem fælden. En **tynd optisk barriere** — omtrent 8 mikrometer bred, tegnet med 675-nanometer-lys ved hjælp af en digital mikrospejlenhed — deler fælden i to halvdele. Den ene halvdel observeres (»den **lyse sektor**«); den anden gør ikke (»den **mørke sektor**«). I forsøgsperioden på omtrent 100 millisekunder viser systemet ikke målbart partikeltab eller dissipation. Det er derfor med god tilnærmelse et lukket system med en Hamilton-operator, som ikke selv afhænger af tiden.

[figure_pair pending]

Til venstre producerer den magneto-optiske fælde den kolde sky af rubidiumatomer inde i glascellen: et tidligt køletrin på vejen mod at forberede kondensatet. Til højre står Giovanni Barontini ved det optiske apparat. Dette er fotografier af laboratoriesystemet bag forsøget, ikke billeder af et bogstaveligt miniatureunivers.

Set med et almindeligt laboratorieur — ét absorptionsbillede hvert 2. millisekund — gør den lyse sektor noget suggestivt. Atomer strømmer over barrieren, og sektoren vokser ud af intet, et øjeblik Barontini kalder »**big bang**«. Den når en maksimal udstrækning, trækker sig derefter sammen og tømmes tilbage til den mørke side, »**big crunch**«. Afhængigt af barrierens højde kan dette gentage sig cyklisk.

Så kommer selve pointen. Laboratorieuret er *eksternt* i forhold til systemet — netop den slags ur, Wheeler–DeWitt-rammen ikke tillader. Barontini spørger derfor: Kan historien om den lyse sektor **ordnes alene ved hjælp af størrelser inde i systemet**? Hans svar er et ur, han kalder **entropisk tid**,

aflæst direkte fra de samme billeder i tre enkle trin. Først udtrækker han fire tal fra hvert absorptionsbillede af den lyse sektor: antallet af atomer, massecentrum i tæthedsprofilen — som spiller rollen som et analogt »skalarfelt« — bredden og entropien, det vil sige entropien pr. atom beregnet med en standardmetode og ganget med atomtallet. For det andet stiger og falder denne entropi, når atomer krydser barrieren. For det tredje følger uret entropigradienten langs den målte massecentrumsbane og tæller størrelsen af hver forskydning, ikke retningen. Når entropi og massecentrum stiger eller falder sammen, går uret frem ved hvert trin, også når skyen vender. I dataene giver dette én sammenhængende ordning fra sektorens »big bang« til dens »big crunch« næsten overalt, med kun nogle få små ujævnheder, hvor den grove prøvetagning betyder, at de to ændringer ikke stemmer overens.

Til sidst udleder han en effektiv **»Schrödinger-ligning i entropisk tid«** — en udviklingsligning for den lyse sektor skrevet med dette interne ur i stedet for det eksterne — og løser den numerisk for at se, om den gengiver det, kameraet faktisk registrerede.

Hvad han fandt

Tre resultater med stigende ambitionsniveau.

- **Det interne ur fungerer som en ordning.** Den entropiske tid stiger monotont næsten overalt, og hastigheden bestemmes af, hvor hurtigt entropi krydser barrieren: Den går hurtigere, når entropi udveksles, og **standser helt, når ingen entropi udveksles**. I det reversible regime med lav barriere går der *slet ingen intern tid* mellem et big crunch og det næste big bang — fordi ingen entropi udveksles dér — selv om laboratorieuret fortsætter med at tikke. I hele datasættet forblev den samlede entropi i begge sektorer konstant inden for fejlmarginerne, som et lukket system kræver.
- **Forskellige regimer giver forskellige »tider«.** Når barrieren hæves, bliver entropiudvekslingen mindre, så det interne ur går langsommere. Når barrieren bliver så høj, at sektorerne næsten ikke kommunikerer, nærmer den lyse sektor sig det, artiklen kalder en »**varmedød**«: en stationær tilstand, hvor den entropiske tid ganske enkelt standser.
- **En effektiv ligning gengiver dataene.** Schrödinger-ligningen i entropisk tid, forsynet med forsøgsparametrene, genskaber numerisk den målte udvikling i skyens bredde. Artiklen rapporterer meget god overensstemmelse i tilfældet med lav barriere, hvor det entropidrevne led dominerer; den eksplicitte numeriske sammenligning udføres for dette tilfælde.

> **Hvad »tidsproblemet« og »entropisk tid« betyder her**
>
> **Tidsproblemet** er, at hovedligningen i kanonisk kvantegravitation, Wheeler–DeWitt-ligningen, ikke har nogen ekstern tidsvariabel. Et almindeligt svar er *relationelt*: Man gør én fysisk størrelse inde i systemet til »ur« og beskriver alt andet i forhold til den. En tilbagevendende vanskelighed er, at naturlige valg af ur ikke altid er monotone — i et system, der kollapser tilbage, går kandidaturet først fremad og derefter baglæns — og derfor ikke kan markere én entydig retning fra start til slut.

> **Entropisk tid** er Barontinis måde at omgå dette på. I stedet for at aflæse en positionslignende variabel bygger han uret af den *entropi*, der udveksles mellem den observerede og den uobserverede sektor, konstrueret sådan, at det ikke vender. Idéen er beslægtet med ældre hypoteser om »termisk tid«, men her defineres tiden operationelt ud fra en målbar entropistrøm i stedet for abstrakt matematisk struktur — netop det, der gør den testbar i et virkeligt apparat.
> Det er afgørende, at de kosmologiske ord — »big bang«, »big crunch«, »skalafaktor«, »skalarfelt«, »miniatureunivers« — er **analoge betegnelser**. De navngiver egenskaber ved en indfanget atomgas, som tilfældigvis er *strukturelt lig* ligningerne i forenklede kosmologiske modeller. De er ikke udsagn om det faktiske univers.

Hvad dette ikke beviser

Her er forsigtighed særlig vigtig, fordi ordvalget inviterer til overdrivelse.

- **Det løser ikke tidsproblemet og hævder heller ikke at gøre det.** Artiklens egen formulering er, at den »etablerer en kontrolleret eksperimentel ramme, hvor konstruktioner af relationel tid kan testes kvantitativt«. En testplatform er ikke et teorem. Om relationel eller entropisk tid er den *rigtige* beskrivelse af tid i kvantegravitation, står lige så åbent som før.
- **Det er en analog, ikke universet.** Ingen kosmologi observeres. Det, der observeres, er et Bose–Einstein-kondensat i en fælde, og den reducerede beskrivelse er *matematisk lig* en forenklet kosmologisk »minisuperspace«-model. Ligheden er pointen med forsøget; den er også grænsen. Intet her viser, at det tidlige univers havde et big bang af denne type, at rumtid består af atomer, eller at »tid ikke findes«.
- **Det viser ikke, at tid »egentlig« er entropi.** Det entropiske ur er én konstrueret ordning, der fungerer godt i dette system. Artiklen peger på et begrebsmæssigt slægtskab med hypotesen om termisk tid, men lader udtrykkeligt spørgsmålet stå åbent, om de to overhovedet falder sammen. »Et internt ur bygget af entropi kan ordne dette forsøg« er en langt snævrere påstand end »tid er entropi«.
- **Den effektive ligning er et modelresultat, ikke en omskrivning af kvantemekanikken.** Den udledte Schrödinger-ligning i entropisk tid går over i almindelig kvantemekanik, når entropistrømmen er langsom, og er strengt den almindelige unitære teori kun, når ingen entropi strømmer. Artiklen fremstiller den som mere generel end standardligningen *specifikt når et observeret system er termodynamisk åbent mod et uobserveret system* — et udsagn om åbne delsystemer i denne type setup, ikke en påstand om, at fundamental fysik skal omskrives på denne måde.
- **Det er ét forsøg, én forfatter og ét valg af ur.** Resultaterne har omtrent 5 procents statistisk usikkerhed pr. datapunkt og bygger på middelværdi- og middeltæthedstilnærmelser. Valget af ur og grovinddelingen er bevidste modelvalg af den slags, som andre grupper vil ønske at undersøge, før de drager strukturelle konklusioner.

Hvor stærk er evidensen?

For den beskedne påstand, artiklen faktisk fremsætter, er evidensen ordentlig. Systemet er reelt godt isoleret på den relevante tidsskala, entropiregnskabet går op — den samlede entropi er konstant inden for fejlmarginerne — det interne ur ordner dataene monotont næsten overalt, og en effektiv ligning, som forfatteren udledte fra den samme model med parametre hentet fra dataene, gengiver den målte dynamik i lavbarrieretilfældet, hvor den blev anvendt. Dataene er åbent tilgængelige. Det er en reel måling af et virkeligt, kontrollerbart system, ikke et tankeeksperiment.

Den vægt, resultatet kan bære, er tilsvarende beskeden. Alt hviler på analogien mellem den reducerede kondensatmodel og minisuperspace-kosmologi, og analogier kan oplyse uden at bevise. At én platform fra én forfatter viser, at én opskrift på intern tid fungerer, er et stærkt proof of principle og et svagt grundlag for påstande om, hvordan tid opfører sig i naturen. Den rigtige læsning er: Metoden er nu noget, man kan *gøre* i et laboratorium og kontrollere.

Hvorfor det betyder noget

Diskussioner om tidsproblemet har længe siddet fast på formalismens niveau, hvor konkurrerende forslag er vanskelige at falsificere, fordi de giver få konkrete, målbare forudsigelser. At gøre selv ét hjørne af denne debat til et forsøg, der kan køres — hvor et internt ur enten ordner dataene eller ikke gør, og en effektiv ligning enten passer eller ikke gør — ændrer argumentets karakter. Det giver teoretikere en arbejdsbænk, hvor de kan afprøve deres værktøjer.

Det er det egentlige bidrag: ikke et svar om tid, men et **sted, hvor spørgsmålet kan stilles kvantitativt**. Platforme med kolde atomer har allerede fungeret som kontrollerbare analoger for Hawking-stråling, ekspanderende universer og henfald af falsk vakuum; dette føjer relationel tid og tidens pil til værktøjskassen. Værdien ligger i de opfølgende forsøg, det muliggør — andre valg af ur, studsende kontra singulær adfærd, test af reversibilitet — som nu kan blive målinger og ikke blot beregninger.

Kort fortalt

En fysiker byggede et Bose–Einstein-kondensat, delte det med en tynd optisk barriere i en observeret og en uobserveret halvdel og brugte den entropi, der strømmede mellem halvdelene, til at konstruere en intern »entropisk tid«. Dette ur ordner den observerede halvdels cyklus af ekspansion og tilbagefald, går hurtigt, når entropi udveksles, og standser, når det ikke sker, og en effektiv ligning skrevet i denne interne tid gengiver de målte data i det lavbarrieretilfælde, forfatteren undersøgte. Setuppet er en analog af »tidsproblemet« i kanonisk kvantegravitation: »big bang«, »big crunch« og »miniatureunivers« er betegnelser for en indfanget gas, som matematisk ligner en forenklet kosmologisk model. Dette er en kontrolleret testplatform for idéer om relationel tid — ikke en løsning på tidsproblemet, ikke en påstand om det virkelige univers og ikke bevis for, at tid »egentlig« er entropi.

Nøgtern vurdering

Hvad artiklen viser: I ét velisoleret system af kolde atomer kan et internt ur defineret ud fra entropiudveksling ordne den observerede dynamik monotont, og en effektiv ligning i »entropisk tid« gengiver den målte udvikling i det undersøgte lavbarrieretilfælde.

Hvad der er plausibelt, men ikke vist: At entropisk eller relationel tid er en god beskrivelse af tid i virkelig kvantegravitation. Forsøget er foreneligt med, at sådanne konstruktioner bør tages alvorligt; det bekræfter dem ikke for naturen.

Hvad den ikke viser: At tidsproblemet er løst; at kvantegravitation er løst; at universet begyndte i et big bang af denne type; at rumtid opstår af atomer; eller at »tid ikke findes«.

Vigtigste begrænsninger: Én platform, én forfatter og ét valg af ur; omtrent 5 procents usikkerhed pr. datapunkt; middelværdi- og middeltæthedstilnærmelser; og frem for alt afhængigheden af en analogi mellem et indfanget kondensat og en forenklet kosmologisk model.

Hvor stor tillid bør en almindelig læser have? Høj tillid til, at forsøget gjorde det, det rapporterer, i sit eget system. Lav tillid til ethvert spring fra denne analog til påstande om tid i det virkelige univers.

Kilder

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