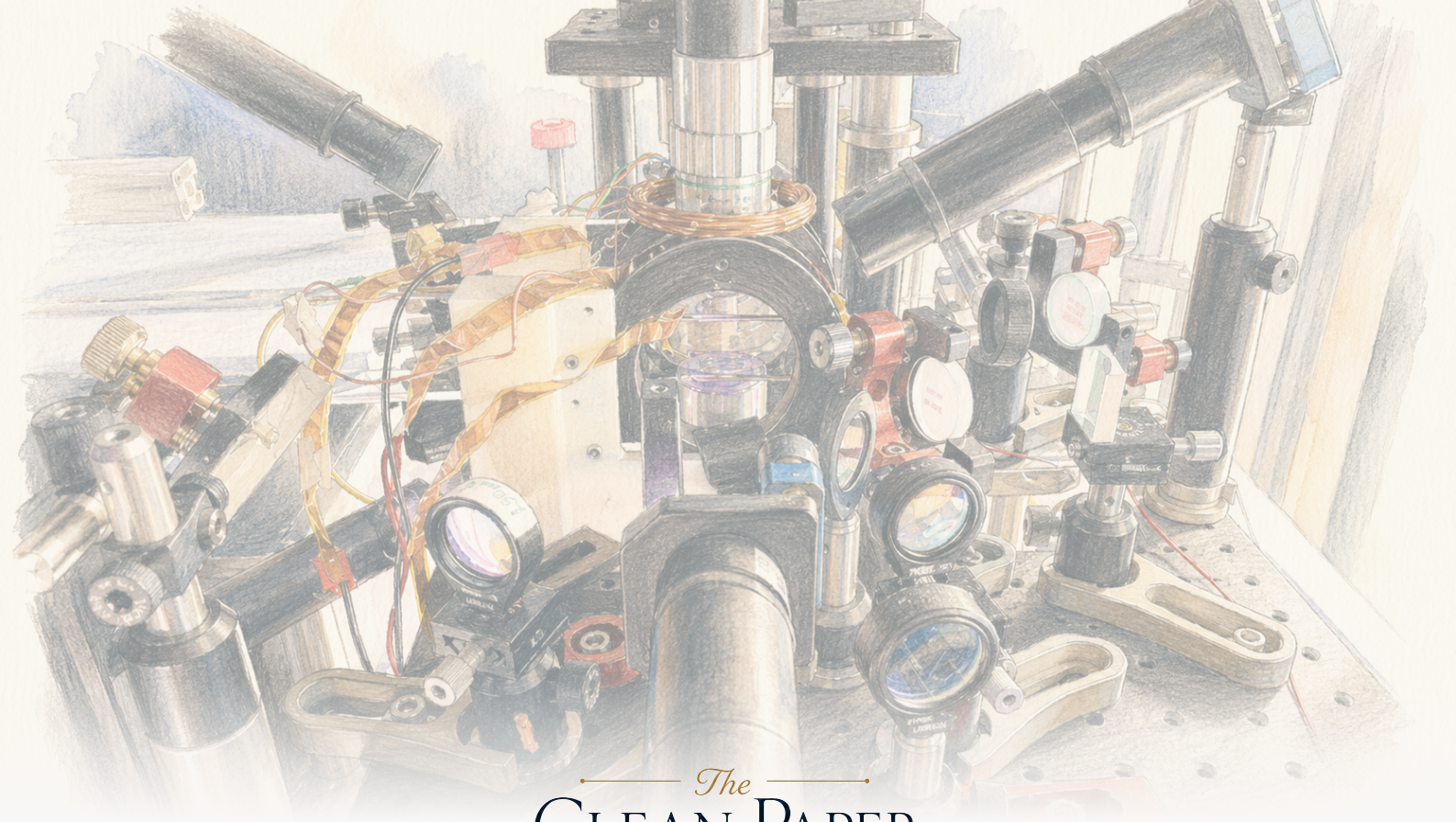

The
CLEAN PAPER

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

'n Koueatoom-eksperiment toets kwantumswaartekrag se 'probleem van tyd'—as 'n laboratoriumanaloog, nie 'n antwoord nie

In kanonieke kwantumswaartekrag het die Wheeler-DeWitt-vergelyking geen eksterne horlosie wat gebeure rangskik nie: die 'probleem van tyd'. 'n Enkelouteur-eksperiment isoleer 'n Bose-Einstein-kondensaat, verdeel dit met 'n dun optiese versperring in 'n onwaargenome en 'n waargenome sektor, en bou 'n interne horlosie uit die entropie wat tussen hulle vloei. Daardie 'entropiese tyd' orden die waargenome sektor se uitdying en ineenstorting, en 'n effektiewe vergelyking reproduseer die gemete data in die ondersoekte laeversperringgeval. Dit is 'n beheerde toetsbank vir relasionele-tydidees: die 'oerknal', 'groot ineenstorting' en 'miniheelal' is analoë etikette vir 'n vasgevange gas, nie werklike kosmologie nie, en die werk beweer nie dat dit die probleem van tyd of kwantumswaartekrag oplos nie.

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

’n Horlosie wat uit entropie gebou is, binne ’n val

In kanonieke kwantumswaartekrag is daar ’n vreemde en hardnekkige raaisel: die sentrale vergelyking bevat geen tyd nie. Die Wheeler-DeWitt-vergelyking, die naaste ekwivalent van ’n Schrödingervergelyking vir die hele heelal, sê eenvoudig dat ’n sekere operator wat op die toestand inwerk nul gee. Daar is geen eksterne parameter wat tik nie, niks wat “voor” en “ná” rangskik nie—tog ervaar ons duidelik dat tyd verbygaan. Dit is die **probleem van tyd**, en dit weerstaan al meer as ’n halfeeu lank ’n oplossing.

’n Enkelouteurartikel in *Physical Review Research* los dit nie op nie. Wat dit doen, is stiller en op sy eie manier nuttiger: dit bou ’n klein, goed beheerde laboratoriumstelsel waarin een familie voorgestelde antwoorde **teen werklike data getoets** kan word. Giovanni Barontini, aan die Universiteit van Birmingham, neem ’n Bose-Einstein-kondensaat—’n wolk ultrakoue atome wat as een kwantumvoorwerp optree—en verander dit in ’n analoog waarop die idee van ’n “interne”, relasionele tyd gemeet eerder as net beredeneer kan word. Die truuk is om ’n horlosie te bou, nie uit ’n buite-stophorlosie nie, maar uit die entropie wat die stelsel binne homself rondskuif.

Die afstand tussen “’n beheerde analoog van die probleem van tyd” en “fisici het tyd opgelos” is die hele verhaal hier, en dit is ’n lang afstand.

Wat die navorser gedoen het

Die apparaat is ’n kondensaat van ongeveer **24 000 rubidium-87-atome** wat in ’n konserwatiewe optiese dipoolval gehou en laat ossilleer word—die hele atoomwolk slinger heen en weer oor die val. ’n **Dun optiese versperring**—ongeveer 8 mikron breed, met 675 nm-lig deur ’n digitale mikrospieël-toestel geskilder—verdeel die val in twee helftes. Een helfte word waargeneem (die “**helder sektor**”); die ander nie (die “**donker sektor**”). Oor die eksperiment se venster van ongeveer 100 millisekondes toon die stelsel geen meetbare deeltjieverlies of dissipasie nie, sodat dit tot ’n goeie benadering ’n geslote stelsel is met ’n Hamiltoniaan wat nie self van tyd afhang nie.

[figure_pair pending]

Links produseer die magneto-optiese val die koue wolk rubidiumatome binne die glassel: ’n vroeë afkoelfase op pad na die voorbereiding van die kondensaat. Regs staan Giovanni Barontini langs die optiese apparaat. Dit is foto’s van die laboratoriumstelsel agter die eksperiment, nie beelde van ’n letterlike miniatuurheelal nie.

Met ’n gewone laboratoriumhorlosie waargeneem—’n absorpsiebeeld elke 2 ms—doen die helder sektor iets treffends. Atome vloei oor die versperring en die sektor groei uit niks (Barontini noem hierdie oomblik die “**oerknal**”), bereik ’n maksimum omvang, trek dan saam en loop terug in die donker kant leeg (die “**groot ineenstorting**”). Afhangend van hoe hoog die versperring is, kan dit siklies herhaal.

Dan kom die werklike punt. Die laboratoriumhorlosie is *ekstern* tot die stelsel—presies die soort ding wat die Wheeler-DeWitt-opset verbied. Barontini vra dus: kan die helder sektor se geskiedenis **slegs**

met groothede intern tot die stelsel gerangskik word? Sy antwoord is 'n horlosie wat hy **entropiese tyd** noem, regstreeks uit dieselfde beelde gelees in drie eenvoudige stappe. Eerstens haal hy uit elke absorpsiebeeld vier getalle vir die helder sektor: sy atoomgetal, die massamiddelpunt van sy digtheidsprofiel (wat die rol van 'n analoë "skalaarveld" speel), sy breedte, en sy entropie—die entropie per atoom, verkry deur 'n standaardmetode, vermenigvuldig met die atoomgetal. Tweedens styg en daal daardie entropie soos atome die versperring oorsteek. Derdens volg die horlosie die entropiegradiënt langs die gemete massamiddelpuntpad en tel die grootte van elke verplasing eerder as die rigting daarvan. Wanneer entropie en massamiddelpunt saam styg of daal, laat elke stap die horlosie vorder, selfs wanneer die wolk omdraai. In die data gee dit byna oral 'n enkele ordening van die sektor se "oerknal" tot sy "groot ineenstorting", met slegs 'n paar klein skommelinge waar growwe monsterneming hierdie twee veranderinge laat verskil.

Laastens lei hy 'n effektiewe **"entropiese-tyd-Schrödingervergelyking"** af—'n evolusievergelyking vir die helder sektor, geskryf in terme van hierdie interne horlosie eerder as die eksterne een—en los dit numeries op om te kyk of dit weergee wat die kamera werklik opgeneem het.

Wat gevind is

Drie resultate, in toenemende orde van ambisie.

- **Die interne horlosie werk as 'n ordening.** Die entropiese tyd groei byna oral monotoon, en sy spoed word bepaal deur hoe vinnig entropie oor die versperring vloei: dit loop vinniger wanneer entropie uitgeruil word en **stop heeltemal wanneer niks uitgeruil word nie**. In die omkeerbare laeversperringregime gaan *geen interne tyd verby nie* tussen 'n groot ineenstorting en die volgende oerknal—omdat geen entropie daar uitgeruil word nie—al bly die laboratoriumhorlosie tik. Oor die hele datastel het die totale entropie van albei sektore saam binne die foutstawe konstant gebly, soos 'n geslote stelsel vereis.
- **Verskillende regimes gee verskillende "tye".** Verhoog die versperring en die entropie-uitruiling krimp, sodat die interne horlosie stadiger loop. Verhoog dit tot die punt waar die twee sektore skaars kommunikeer, en die helder sektor nader wat die artikel 'n "**hittedood**" noem: 'n stilstaande toestand waarin die entropiese tyd eenvoudig tot stilstand kom.
- **'n Effektiewe vergelyking reproduseer die data.** Die entropiese-tyd-Schrödingervergelyking, gevoed met die eksperimentele parameters, herstel numeries die gemete ontwikkeling van die wolk se breedte, met die artikel wat uitstekende ooreenstemming vir die laeversperringgeval rapporteer (waar die entropiegedrewe term oorheers); die eksplisiete numeriese vergelyking word vir daardie geval gemaak.

> **Wat die "probleem van tyd" is, en wat "entropiese tyd" hier is**
>
> **Die probleem van tyd** is dat kanonieke kwantumswaartekrag se hoofvergelyking (Wheeler-DeWitt) geen eksterne tydveranderlike het nie. 'n Algemene reaksie is *relasioneel*: bevorder een fisiese grootheid binne die stelsel tot die "horlosie", en beskryf alles anders relatief daartoe. 'n

> Herhalende probleem is dat natuurlike horlosiekeuses nie altyd monotoon is nie—'n stelsel wat weer ineenstort, laat die kandidaathorlosie vorentoe en dan agteruit loop—sodat dit nie 'n enkele rigting van begin tot einde netjies kan etiketteer nie.
> **Entropiese tyd** is Barontini se manier om dit te omseil. In plaas daarvan om 'n posisieagtige veranderlike te lees, bou hy die horlosie uit die *entropie* wat tussen die waargenome en onwaargenome sektore uitgeruil word, en konstrueer dit so dat dit nie omkeer nie. Dit is in gees nou verwant aan ouer idees oor "termiese tyd", maar hier word dit operasioneel uit 'n meetbare entropievloei gedefinieer eerder as uit abstrakte wiskundige struktuur—presies wat dit op 'n werklike apparaat toetsbaar maak.
> Belangrik: die kosmologiese woorde—"oerknal", "groot ineenstorting", "skaalfaktor", "skalaarveld", "miniheelal"—is **analoë etikette**. Hulle benoem kenmerke van 'n vasgevange gas van atome wat toevallig *struktureel soortgelyk* is aan die vergelykings van vereenvoudigde kosmologiese modelle. Hulle is nie stellings oor die werklike heelal nie.

Wat dit nie bewys nie

Hier is sorg die belangrikste, want die woordeskat nooi oordrywing uit.

- **Dit los nie die probleem van tyd op nie en beweer nie dat dit dit doen nie.** Die artikel se eie raamwerk is dat dit "'n beheerde eksperimentele omgewing vestig waarin relasionele-tydkonstruksies kwantitatief getoets kan word." 'n Toetsbank is nie 'n stelling nie. Of relasionele of entropiese tyd die *regte* beskrywing van tyd in kwantumswaartekrag is, bly net so oop soos voorheen.
- **Dit is 'n analoog, nie die heelal nie.** Geen kosmologie word waargeneem nie. 'n Bose-Einstein-kondensaat in 'n val word waargeneem, en sy gereduseerde beskrywing is *wiskundig soortgelyk* aan 'n vereenvoudigde ("minisuperruimte"-) kosmologiese model. Die ooreenkoms is die punt van die eksperiment; dit is ook sy grens. Niks hier toon dat die vroeë heelal 'n oerknal van hierdie soort gehad het, dat ruimtetyd uit atome gemaak is of dat "tyd nie bestaan nie".
- **Dit toon nie dat tyd 'werklik' entropie is nie.** Die entropiese horlosie is een gekonstrueerde ordening wat goed op hierdie stelsel werk. Die artikel merk konseptuele verwantskap met die termiese-tyd-hipotese op, maar laat uitdruklik oop of die twee selfs saamval. "'n Interne horlosie wat uit entropie gebou is, kan hierdie eksperiment orden" is 'n veel nouer bewering as "tyd is entropie".
- **Die effektiewe vergelyking is 'n modelleringsresultaat, nie 'n herskrywing van kwantummeganika nie.** Die afgeleide entropiese-tyd-Schrödingervergelyking reduseer tot gewone kwantummeganika wanneer die entropievloei stadig is, en is streng die gewone unitêre teorie slegs wanneer geen entropie vloei nie. Die artikel posisioneer dit as algemener as die standaardvergelyking *spesifiek wanneer 'n waargenome stelsel termodinamies oop is vir 'n onwaargenome een*—'n stelling oor oop substelsels in hierdie soort opstelling, nie 'n bewering dat fundamentele fisika noodwendig so herskryf moet word nie.
- **Dit is een eksperiment, een outeur, een horlosiekeuse.** Die resultate dra ongeveer 5% statistiese onsekerheid per punt en steun op gemiddeldeveld- en gemiddeldedigtheidsbenaderings. Die

gekose horlosie en grofkorreling is doelbewuste modelbesluite wat ander groepe sal wil toets voordat strukturele gevolgtrekkings gemaak word.

Hoe sterk is die bewys?

Vir die beskeie ding wat dit werklik beweer, is die bewys duidelik. Die stelsel is op die relevante tydskaal werklik goed geïsoleer, die entropierekening klop (totale entropie konstant binne fout), die interne horlosie orden die data byna oral monotoon, en ’n effektiewe vergelyking, deur die outeur uit dieselfde model met parameters uit die data afgelei, reproduseer die gemete dinamika vir die laeversperringgeval waarop dit toegepas is. Die data is openlik beskikbaar. Dit is ’n werklike meting van ’n werklike, beheerbare stelsel, nie ’n gedagte-eksperiment nie.

Die gewig wat dit kan dra, is dienooreenkomstig beskeie. Alles rus op die analogie tussen die gereduseerde kondensaatmodel en minisuperruimte-kosmologie, en analogieë verhelder sonder om te bewys. Een platform, van een outeur, wat toon dat een interne-tydresep werk, is ’n sterk bewys van beginsel en ’n swak basis vir enige bewering oor hoe tyd in die natuur optree. Die regte lees is: die metode is nou iets wat jy in ’n laboratorium kan *doen* en nagaan.

Waarom dit saak maak

Debatte oor die probleem van tyd sit lank reeds op die vlak van formalisme vas, waar mededingende voorstelle moeilik weerlêbaar is omdat hulle min konkrete, meetbare voorspellings maak. Om selfs ’n hoek van daardie debat in ’n uitvoerbare eksperiment te verander—waar ’n interne horlosie jou data óf orden óf nie, waar ’n effektiewe vergelyking óf pas óf nie—verander die aard van die argument. Dit gee teoretici ’n werkbank waarop hulle hul gereedskap kan toets.

Dit is die werklike bydrae: nie ’n antwoord oor tyd nie, maar ’n **plek om die vraag kwantitatief te vra**. Koueatoomplatforms het reeds as beheerbare analoë vir Hawkingstraling, uitdyende heelalle en valsvakuumverval gedien; dit voeg relasionele tyd en die tydspyl by daardie gereedskapkis. Die waarde lê in die opvolgwerk wat dit moontlik maak—verskillende horlosiekeuses, bonsende teenoor singuliere gedrag, toetse van omkeerbaarheid—elkeen nou ’n meting eerder as net ’n berekening.

Kortliks

’n Fisikus het ’n Bose-Einstein-kondensaat gebou, dit met ’n dun optiese versperring in ’n waargenome en ’n onwaargenome helfte verdeel, en die entropie wat tussen die helftes vloei gebruik om ’n interne “entropiese tyd” te konstrueer. Daardie horlosie orden die waargenome helfte se uitdy-en-ineenstort-siklus, loop vinnig wanneer entropie uitgeruil word en stop wanneer dit nie gebeur nie, en ’n effektiewe vergelyking wat in hierdie interne tyd geskryf is, reproduseer die gemete data in die

laeversperringgeval wat die outeur ondersoek het. Die opstelling is ’n analoog van die “probleem van tyd” uit kanonieke kwantumswaartekrag: die “oerknal”, “groot ineenstorting” en “miniheelal” is etikette vir ’n vasgevange gas wat wiskundig soortgelyk is aan ’n vereenvoudigde kosmologiese model. Dit is ’n beheerde toetsbank vir relasionele-tydidees—nie ’n oplossing vir die probleem van tyd nie, nie ’n bewering oor die werklike heelal nie en nie bewys dat tyd “werklik” entropie is nie.

Nugtere beoordeling

Wat die artikel toon: In een goed geïsoleerde koueatoomstelsel kan ’n interne horlosie wat uit entropie-uitruiling gedefinieer word, die waargenome dinamika monotoon orden, en ’n effektiewe “entropiese-tyd”-vergelyking reproduseer die gemete ontwikkeling in die laeversperringgeval wat ondersoek is.

Wat geloofwaardig maar nie getoon is nie: Dat entropiese of relasionele tyd ’n goeie beskrywing van tyd in werklike kwantumswaartekrag is. Die eksperiment is versoenbaar daarmee om sulke konstruksies ernstig op te neem; dit bevestig hulle nie vir die natuur nie.

Wat dit nie toon nie: Dat die probleem van tyd opgelos is; dat kwantumswaartekrag opgelos is; dat die heelal in ’n oerknal van hierdie soort begin het; dat ruimtetyd uit atome ontstaan; of dat “tyd nie bestaan nie”.

Belangrikste beperkings: Een platform, een outeur en een horlosiekeuse; ongeveer 5% onsekerheid per punt; gemiddeldeveld- en gemiddeldedigtheidsbenaderings; en bowenal afhanklikheid van ’n analogie tussen ’n vasgevange kondensaat en ’n vereenvoudigde kosmologiese model.

Hoeveel vertroue behoort ’n algemene leser te hê? Hoë vertroue dat die eksperiment op sy eie stelsel gedoen het wat dit rapporteer. Lae vertroue in enige sprong van hierdie analoog na bewerings oor tyd in die werklike heelal.

Bronne

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