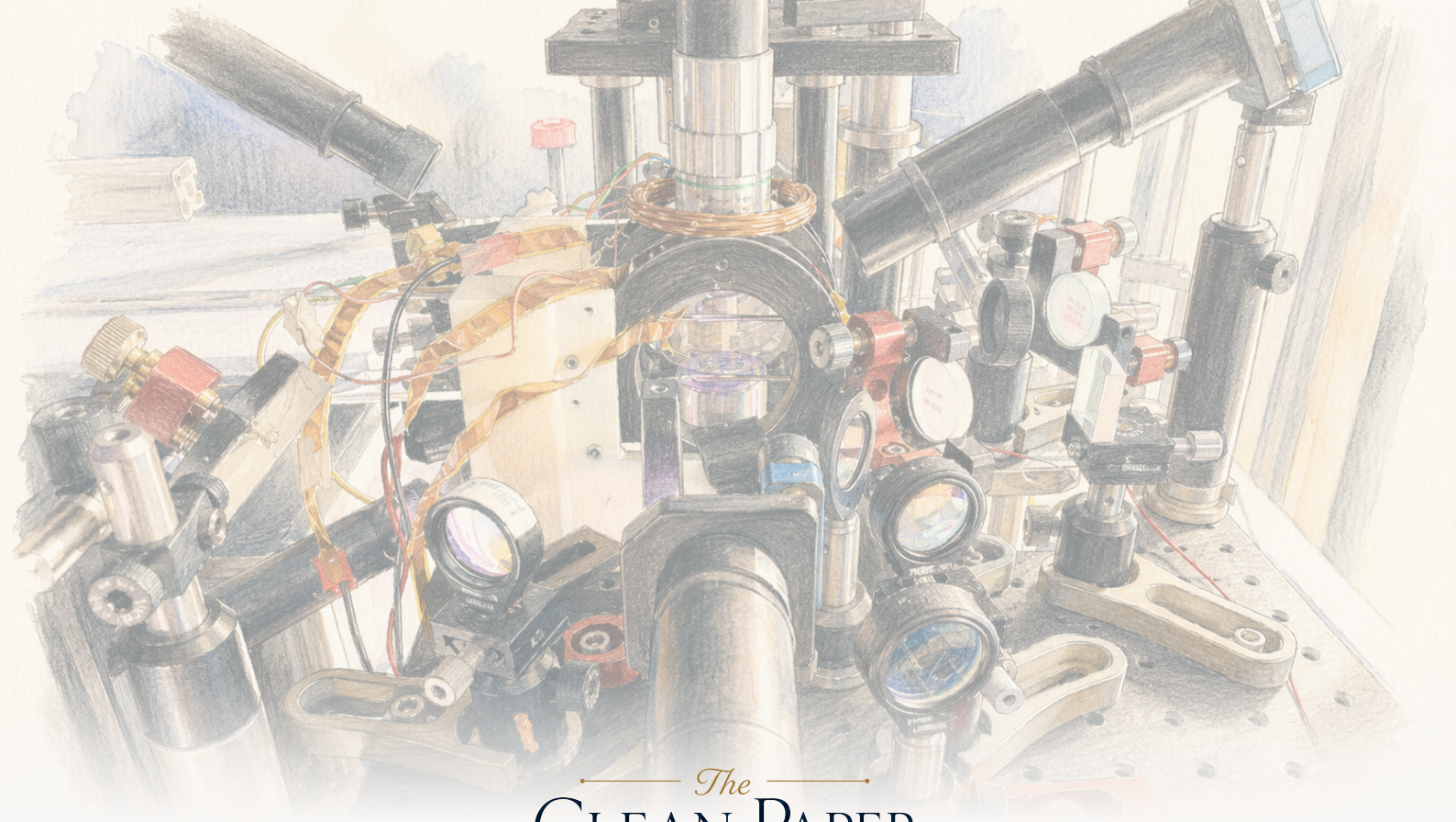

The
CLEAN PAPER

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

Een experiment met koude atomen test het ‘probleem van de tijd’ uit de kwantumzwaartekracht — als laboratoriumanalogon, niet als antwoord

In canonieke kwantumzwaartekracht bevat de Wheeler-DeWittvergelijking geen externe klok om gebeurtenissen te ordenen: het ‘probleem van de tijd’. Een eenauteursexperiment isoleert een Bose-Einsteincondensaat, splitst het met een dunne optische barrière in een niet-waargenomen en een waargenomen sector en bouwt een interne klok uit de entropie die ertussen stroomt. Die ‘entropische tijd’ ordent de uitzetting en herinstorting van de waargenomen sector, en een effectieve vergelijking reproduceert de gemeten gegevens in het onderzochte geval met lage barrière. Het is een gecontroleerde proefbank voor ideeën over relationele tijd: ‘oerknal’, ‘eindkrak’ en ‘mini-universum’ zijn analoge labels voor een gevangen gas, geen echte kosmologie, en het werk beweert niet het probleem van de tijd of de kwantumzwaartekracht op te lossen.

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

Een klok gebouwd uit entropie, binnen een val

In de canonieke kwantumzwaartekracht bestaat een vreemd en hardnekkig raadsel: in de centrale vergelijking komt geen tijd voor. De Wheeler-DeWittvergelijking, het dichtst bij een Schrödingervergelijking voor het hele universum, zegt eenvoudigweg dat een bepaalde operator die op de toestand werkt nul oplevert. Er is geen externe parameter die tikt, niets dat „voor" en „na" ordent — terwijl wij duidelijk ervaren dat de tijd verstrijkt. Dit is het **probleem van de tijd**, en het weerstaat al meer dan een halve eeuw een oplossing.

Een eenauteursartikel in *Physical Review Research* lost het niet op. Wat het doet is stiller en op zijn eigen manier nuttiger: het bouwt een klein, goed gecontroleerd laboratoriumsysteem waarin één familie van voorgestelde antwoorden **aan echte gegevens kan worden getoetst**. Giovanni Barontini van de University of Birmingham neemt een Bose-Einsteincondensaat — een wolk ultrakoude atomen die zich als één kwantumobject gedraagt — en maakt er een analogon van waarop het idee van een „interne", relationele tijd kan worden gemeten in plaats van alleen besproken. De truc is om een klok niet met een externe stopwatch te bouwen, maar uit de entropie die het systeem binnen zichzelf uitwisselt.

De afstand tussen „een gecontroleerd analogon van het probleem van de tijd" en „natuurkundigen hebben de tijd opgelost" is hier het hele verhaal, en die afstand is groot.

Wat de onderzoeker deed

De opstelling bestaat uit een condensaat van ongeveer **24.000 rubidium-87-atomen**, vastgehouden in een conservatieve optische dipoolval en aan het oscilleren gebracht — de hele atoomwolk klotst heen en weer door de val. Een **dunne optische barrière** — ongeveer 8 micrometer breed, met licht van 675 nm geprojecteerd via een digitale microspiegelchip — verdeelt de val in twee helften. Eén helft wordt gevolgd, de „**heldere sector**"; de andere niet, de „**donkere sector**". Binnen het venster van ongeveer 100 milliseconden van het experiment vertoont het systeem geen meetbaar deeltjesverlies of dissipatie. Het is dus bij goede benadering een gesloten systeem met een Hamiltoniaan die zelf niet van de tijd afhangt.

[figure_pair pending]

Links produceert de magneto-optische val de koude wolk rubidiumatomen in de glazen cel: een vroege koelfase op weg naar de voorbereiding van het condensaat. Rechts staat Giovanni Barontini naast de optische opstelling. Dit zijn foto's van het laboratoriumsysteem achter het experiment, geen beelden van een letterlijk miniatuuruniversum.

Bekeken met een gewone laboratoriumklok — elke 2 ms een absorptiebeeld — doet de heldere sector iets suggestiefs. Atomen stromen over de barrière en de sector groeit uit het niets, een moment dat Barontini de „**oerknal**" noemt, bereikt zijn grootste omvang en trekt vervolgens samen totdat hij terug in de donkere kant leegloopt, de „**eindkrak**". Afhankelijk van de hoogte van de barrière kan dit zich cyclisch herhalen.

Dan komt het eigenlijke punt. De laboratoriumklok staat *buiten* het systeem — precies het soort klok dat in de Wheeler-DeWittcontext niet beschikbaar is. Barontini vraagt daarom: kan de geschiedenis van de heldere sector worden **geordend met alleen grootheden binnen het systeem**? Zijn antwoord is een klok die hij **entropische tijd** noemt, rechtstreeks uit dezelfde beelden afgelezen in drie eenvoudige stappen. Eerst haalt hij uit elk absorptiebeeld vier getallen voor de heldere sector: het aantal atomen, het massamiddelpunt van het dichtheidsprofiel — dat de rol speelt van een analoog „scalair veld" — de breedte en de entropie, berekend als de entropie per atoom volgens een standaardmethode vermenigvuldigd met het aantal atomen. Ten tweede stijgt en daalt die entropie terwijl atomen de barrière oversteken. Ten derde volgt de klok de entropiegradiënt langs het gemeten pad van het massamiddelpunt, waarbij de grootte van elke verplaatsing telt en niet de richting. Wanneer entropie en massamiddelpunt samen stijgen of dalen, zet elke stap de klok vooruit, ook wanneer de wolk omkeert. In de gegevens levert dat bijna overal één ordening van de „oerknal" tot de „eindkrak" van de sector op, met slechts enkele kleine schommelingen waar de grove bemonstering die twee veranderingen niet laat overeenkomen.

Ten slotte leidt hij een effectieve **„Schrödingervergelijking in entropische tijd"** af — een evolutievergelijking voor de heldere sector geschreven in termen van deze interne klok in plaats van de externe — en lost hij die numeriek op om te zien of ze reproduceert wat de camera daadwerkelijk registreerde.

Wat ze vonden

Drie resultaten, in oplopende ambitie.

- **De interne klok werkt als ordening.** De entropische tijd groeit bijna overal monotoon, en haar snelheid wordt bepaald door hoe snel entropie de barrière oversteekt: ze loopt sneller wanneer entropie wordt uitgewisseld en **staat volledig stil wanneer dat niet gebeurt**. In het omkeerbare regime met lage barrière verstrijkt tussen een eindkrak en de volgende oerknal *helemaal geen interne tijd* — omdat daar geen entropie wordt uitgewisseld — hoewel de laboratoriumklok blijft tikken. Over de hele dataset bleef de totale entropie van beide sectoren samen binnen de foutmarges constant, zoals voor een gesloten systeem vereist is.
- **Verschillende regimes geven verschillende „tijden".** Verhoog de barrière en de entropieuitwisseling neemt af, waardoor de interne klok langzamer loopt. Verhoog haar tot het punt waarop beide sectoren nauwelijks nog communiceren, en de heldere sector nadert wat het artikel een „**warmtedood**" noemt: een stationaire toestand waarin de entropische tijd eenvoudig stopt.
- **Een effectieve vergelijking reproduceert de gegevens.** De Schrödingervergelijking in entropische tijd, gevoed met de experimentele parameters, reconstrueert numeriek de gemeten evolutie van de breedte van de wolk. Het artikel rapporteert uitstekende overeenstemming voor het geval met lage barrière, waar de entropiegedreven term domineert; de expliciete numerieke vergelijking wordt voor dat geval gemaakt.

Wat het „probleem van de tijd" en „entropische tijd" hier zijn

Het probleem van de tijd is dat de hoofdvergelijking van canonieke kwantumzwaartekracht, de Wheeler-DeWittvergelijking, geen externe tijdvariabele bevat. Een veelvoorkomende reactie is *relationeel*: bevorder één fysieke grootheid binnen het systeem tot „klok" en beschrijf al het andere ten opzichte daarvan. Een terugkerend probleem is dat natuurlijke klokkeuzen niet altijd monotoon zijn — in een opnieuw instortend systeem loopt de kandidaat-klok eerst vooruit en dan achteruit — zodat ze niet netjes één richting van begin tot eind kan labelen.
Entropische tijd is Barontini's manier om dat te omzeilen. In plaats van een positieachtige variabele af te lezen, bouwt hij de klok uit de *entropie* die tussen de waargenomen en niet-waargenomen sectoren wordt uitgewisseld, zo geconstrueerd dat ze niet omkeert. Het idee is verwant aan oudere voorstellen over „thermische tijd", maar wordt hier operationeel gedefinieerd uit een meetbare entropiestroom in plaats van uit een abstracte wiskundige structuur — precies wat het toetsbaar maakt op een echt apparaat.
Cruciaal is dat de kosmologische woorden — „oerknal", „eindkrak", „schaalfactor", „scalair veld", „mini-universum" — **analoge labels** zijn. Ze benoemen kenmerken van een gevangen atoomgas die toevallig *structureel vergelijkbaar* zijn met de vergelijkingen van vereenvoudigde kosmologische modellen. Het zijn geen uitspraken over het echte universum.

Wat dit niet bewijst

Hier is zorgvuldigheid het belangrijkst, omdat de woordenschat uitnodigt tot overdrijving.

- **Het lost het probleem van de tijd niet op en beweert dat ook niet.** Het artikel stelt zelf dat het „een gecontroleerde experimentele omgeving vastlegt waarin constructies van relationele tijd kwantitatief kunnen worden getest". Een proefbank is geen stelling. Of relationele of entropische tijd de *juiste* beschrijving van tijd in kwantumzwaartekracht is, blijft precies zo open als daarvoor.
- **Het is een analogon, niet het universum.** Er wordt geen kosmologie waargenomen. Er wordt een Bose-Einsteincondensaat in een val waargenomen, waarvan de gereduceerde beschrijving *wiskundig lijkt* op een vereenvoudigd kosmologisch model van het type „minisuperspace". De gelijkenis is het doel van het experiment; ze is ook de grens ervan. Niets hier laat zien dat het vroege universum een dergelijke oerknal had, dat ruimtetijd uit atomen bestaat of dat „tijd niet bestaat".
- **Het laat niet zien dat tijd „werkelijk" entropie is.** De entropische klok is één geconstrueerde ordening die goed werkt voor dit systeem. Het artikel merkt conceptuele verwantschap met de hypothese van thermische tijd op, maar laat uitdrukkelijk open of beide zelfs samenvallen. „Een interne klok op basis van entropie kan dit experiment ordenen" is een veel smallere claim dan „tijd is entropie".
- **De effectieve vergelijking is een modelresultaat, geen herschrijving van de kwantummechanica.** De afgeleide Schrödingervergelijking in entropische tijd reduceert tot gewone kwantummechanica wanneer de entropiestroom langzaam is, en is alleen strikt de gebruikelijke unitaire theorie wanneer helemaal geen entropie stroomt. Het artikel presenteert haar als algemener dan

de standaardvergelijking *specifiek wanneer een waargenomen systeem thermodynamisch openstaat voor een niet-waargenomen systeem* — een uitspraak over open subsystemen in dit soort opstelling, niet dat de fundamentele natuurkunde noodzakelijk zo moet worden herschreven.

- **Het is één experiment, één auteur en één klokkeuze.** De resultaten hebben ongeveer 5% statistische onzekerheid per datapunt en steunen op gemiddeldeveld- en gemiddeldedichtheidsbenaderingen. De gekozen klok en grofkorreligheid zijn bewuste modelkeuzen die andere groepen zullen willen onderzoeken voordat structurele conclusies worden getrokken.

Hoe sterk is het bewijs

Voor de bescheiden claim die het daadwerkelijk maakt, is het bewijs helder. Het systeem is op de relevante tijdschaal werkelijk goed geïsoleerd, de entropieboekhouding sluit — totale entropie constant binnen de foutmarges — de interne klok ordent de gegevens bijna overal monotoon, en een effectieve vergelijking die de auteur uit hetzelfde model heeft afgeleid met parameters uit de gegevens reproduceert de gemeten dynamica voor het geval met lage barrière waarop ze werd toegepast. De gegevens zijn openbaar beschikbaar. Dit is een echte meting aan een echt, controleerbaar systeem, geen gedachte-experiment.

Het gewicht dat het kan dragen is navenant bescheiden. Alles rust op de analogie tussen het gereduceerde condensaatmodel en minisuperspacekosmologie, en analogieën kunnen verhelderen zonder te bewijzen. Eén platform van één auteur dat laat zien dat één recept voor interne tijd werkt, is een sterk proof of principle en een zwakke basis voor uitspraken over hoe tijd zich in de natuur gedraagt. De juiste lezing is: de methode is nu iets wat je in een laboratorium kunt *doen* en controleren.

Waarom het ertoe doet

Discussies over het probleem van de tijd zijn lang blijven steken op het niveau van formalisme, waar concurrerende voorstellen moeilijk te weerleggen zijn omdat ze weinig concrete, meetbare voorspellingen doen. Zelfs maar een hoek van dat debat veranderen in een uitvoerbaar experiment — waarbij een interne klok je gegevens wel of niet ordent en een effectieve vergelijking wel of niet past — verandert het karakter van de discussie. Het geeft theoretici een werkbank waarop ze hun gereedschap kunnen testen.

Dat is de werkelijke bijdrage: geen antwoord over tijd, maar een **plaats om de vraag kwantitatief te stellen**. Platformen met koude atomen hebben al gediend als controleerbare analoga voor Hawkingstraling, uitdijende universa en verval van een vals vacuüm; dit voegt relationele tijd en de pijl van de tijd aan die gereedschapskist toe. De waarde zit in de vervolgexperimenten die het mogelijk maakt — andere klokkeuzen, stuiterende tegenover singuliere ontwikkeling, tests van omkeerbaarheid — elk nu een meting en niet alleen een berekening.

Heldere samenvatting

Een natuurkundige bouwde een Bose-Einsteincondensaat, splitste het met een dunne optische barrière in een waargenomen en een niet-waargenomen helft, en gebruikte de entropie die tussen beide stroomt om een interne „entropische tijd” te construeren. Die klok ordent de uitzettings- en herinstortingscyclus van de waargenomen helft, loopt snel wanneer entropie wordt uitgewisseld en stopt wanneer dat niet gebeurt. Een effectieve vergelijking geschreven in deze interne tijd reproduceert de gemeten gegevens in het onderzochte geval met lage barrière. De opstelling is een analogon van het „probleem van de tijd” uit canonieke kwantumzwaartekracht: de „oerknal”, „eindkrak” en het „miniuniversum” zijn labels voor een gevangen gas dat wiskundig lijkt op een vereenvoudigd kosmologisch model. Het is een gecontroleerde proefbank voor ideeën over relationele tijd — geen oplossing van het probleem van de tijd, geen uitspraak over het echte universum en geen bewijs dat tijd „werkelijk” entropie is.

Zonder omwegen

Wat het artikel laat zien: In één goed geïsoleerd systeem met koude atomen kan een interne klok die uit entropie-uitwisseling wordt gedefinieerd de waargenomen dynamica monotoon ordenen, en een effectieve vergelijking in „entropische tijd” reproduceert de gemeten evolutie in het onderzochte geval met lage barrière.

Wat plausibel maar niet aangetoond is: Dat entropische of relationele tijd een goede beschrijving is van tijd in echte kwantumzwaartekracht. Het experiment is verenigbaar met het serieus nemen van zulke constructies; het bevestigt ze niet voor de natuur.

Wat het niet laat zien: Dat het probleem van de tijd is opgelost; dat kwantumzwaartekracht is opgelost; dat het universum met een dergelijke oerknal begon; dat ruimtetijd uit atomen ontstaat; of dat „tijd niet bestaat”.

Belangrijkste beperkingen: Eén platform, één auteur en één klokkeuze; ongeveer 5% onzekerheid per datapunt; gemiddeldeveld- en gemiddeldedichtheidsbenaderingen; en bovenal de afhankelijkheid van een analogie tussen een gevangen condensaat en een vereenvoudigd kosmologisch model.

Hoeveel vertrouwen moet een algemene lezer hebben? Veel vertrouwen dat het experiment op zijn eigen systeem deed wat wordt gerapporteerd. Weinig vertrouwen in elke sprong van dit analogon naar uitspraken over tijd in het echte universum.

Bronnen

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