



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

Ein Kaltatomexperiment prüft das „Problem der Zeit“ der Quantengravitation – als Laboranalogon, nicht als Antwort

In der kanonischen Quantengravitation besitzt die Wheeler-DeWitt-Gleichung keine äußere Uhr, die Ereignisse ordnet: das „Problem der Zeit“. Ein Experiment eines einzelnen Autors isoliert ein Bose-Einstein-Kondensat, teilt es mit einer dünnen optischen Barriere in einen unbeobachteten und einen beobachteten Sektor und baut aus der zwischen ihnen fließenden Entropie eine innere Uhr. Diese „entropische Zeit“ ordnet Expansion und Rekollaps des beobachteten Sektors, und eine effektive Gleichung reproduziert im untersuchten Fall niedriger Barriere die Messdaten. Es ist ein kontrolliertes Testbett für relationale Zeitkonzepte: „Urknall“, „Big Crunch“ und „Miniuniversum“ sind Analogbezeichnungen für ein gefangenes Gas, keine reale Kosmologie, und die Arbeit beansprucht weder eine Lösung des Zeitproblems noch der Quantengravitation.

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

Eine aus Entropie gebaute Uhr in einer Falle

In der kanonischen Quantengravitation gibt es ein seltsames und hartnäckiges Rätsel: In der zentralen Gleichung kommt keine Zeit vor. Die Wheeler-DeWitt-Gleichung, das Nächste an einer Schrödinger-Gleichung für das gesamte Universum, sagt schlicht, dass ein bestimmter Operator auf den Zustand angewandt null ergibt. Es gibt keinen äußeren Parameter, der tickt, nichts, das „vorher“ und „nachher“ ordnet – und doch erleben wir offensichtlich das Vergehen der Zeit. Dies ist das **Problem der Zeit**, und es widersetzt sich seit mehr als einem halben Jahrhundert einer Lösung.

Eine Arbeit eines einzelnen Autors in *Physical Review Research* löst es nicht. Sie tut etwas Ruhigeres und auf eigene Weise Nützlicheres: Sie baut ein kleines, gut kontrolliertes Laborsystem, in dem sich eine Familie vorgeschlagener Antworten **an realen Daten prüfen** lässt. Giovanni Barontini von der University of Birmingham nimmt ein Bose-Einstein-Kondensat – eine Wolke ultrakalter Atome, die sich wie ein einziges Quantenobjekt verhält – und macht daraus ein Analogsystem, an dem sich die Idee einer „inneren“, relationalen Zeit messen statt nur diskutieren lässt. Der Trick besteht darin, die Uhr nicht aus einer äußeren Stoppuhr zu bauen, sondern aus der Entropie, die das System in seinem Inneren umverteilt.

Der Abstand zwischen „einem kontrollierten Analogon des Zeitproblems“ und „Physiker haben die Zeit gelöst“ ist die ganze Geschichte – und er ist groß.

Was der Forscher tat

Die Apparatur besteht aus einem Kondensat von ungefähr **24.000 Rubidium-87-Atomen**, das in einer konservativen optischen Dipolfalle gehalten und in Schwingung versetzt wird – die gesamte Atomwolke schwappt in der Falle hin und her. Eine **dünne optische Barriere** – ungefähr 8 Mikrometer breit, mit 675-nm-Licht durch ein digitales Mikrospiegelgerät erzeugt – teilt die Falle in zwei Hälften. Eine Hälfte wird beobachtet, der **„helle Sektor“**; die andere nicht, der **„dunkle Sektor“**. Im ungefähr 100 Millisekunden langen Versuchsfenster zeigt das System keinen messbaren Teilchenverlust und keine messbare Dissipation. Es ist daher in guter Näherung ein geschlossenes System mit einem Hamiltonoperator, der selbst nicht von der Zeit abhängt.

[figure_pair pending]

Links erzeugt die magneto-optische Falle die kalte Wolke aus Rubidiumatomen in der Glaszelle: eine frühe Kühlstufe auf dem Weg zur Herstellung des Kondensats. Rechts steht Giovanni Barontini neben der optischen Apparatur. Dies sind Fotografien des Laborsystems hinter dem Experiment, keine Bilder eines buchstäblichen Miniaturuniversums.

Mit einer gewöhnlichen Laboruhr beobachtet – einem Absorptionsbild alle 2 Millisekunden – tut der helle Sektor etwas suggestives. Atome fließen über die Barriere, und der Sektor wächst aus dem Nichts – Barontini nennt diesen Moment den **„Urknall“** –, erreicht eine maximale Ausdehnung, zieht sich anschließend zusammen und leert sich zurück auf die dunkle Seite, den **„Big Crunch“**. Je nach Höhe der Barriere kann sich dies zyklisch wiederholen.

Dann kommt der eigentliche Punkt. Die Laboruhr ist *außerhalb* des Systems – genau die Art von Uhr, die im Wheeler-DeWitt-Rahmen verboten ist. Barontini fragt daher: Kann die Geschichte des hellen Sektors **nur mit Größen innerhalb des Systems geordnet werden**? Seine Antwort ist eine Uhr, die er **entropische Zeit** nennt und in drei einfachen Schritten direkt aus denselben Bildern liest. Erstens entnimmt er jedem Absorptionsbild vier Größen für den hellen Sektor: seine Atomzahl, den Schwerpunkt seines Dichteprofiles – der die Rolle eines analogen „Skalarfeldes“ spielt –, seine Breite und seine Entropie, also die Entropie pro Atom nach einer Standardmethode multipliziert mit der Atomzahl. Zweitens steigt und fällt diese Entropie, während Atome die Barriere überqueren. Drittens folgt die Uhr dem Entropiegradienten entlang des gemessenen Schwerpunktpfads und zählt den Betrag jeder Verschiebung statt ihrer Richtung. Wenn Entropie und Schwerpunkt gemeinsam steigen oder fallen, rückt die Uhr bei jedem Schritt vor, selbst wenn die Wolke umkehrt. In den Daten ergibt dies fast überall eine einzige Ordnung vom „Urknall“ des Sektors bis zu seinem „Big Crunch“, mit nur wenigen kleinen Zacken dort, wo grobe zeitliche Abtastung die beiden Veränderungen auseinanderlaufen lässt.

Schließlich leitet er eine effektive „**Schrödinger-Gleichung in entropischer Zeit**“ ab – eine Entwicklungsgleichung für den hellen Sektor, geschrieben mit dieser inneren statt der äußeren Uhr – und löst sie numerisch, um zu prüfen, ob sie das von der Kamera tatsächlich aufgezeichnete Verhalten reproduziert.

Was gefunden wurde

Drei Ergebnisse, mit zunehmendem Anspruch.

- **Die innere Uhr funktioniert als Ordnung.** Die entropische Zeit wächst fast überall monoton, und ihre Geschwindigkeit wird davon bestimmt, wie schnell Entropie die Barriere überquert: Sie läuft schneller, wenn Entropie ausgetauscht wird, und **hält vollständig an, wenn kein Austausch stattfindet**. Im reversiblen Bereich niedriger Barriere vergeht zwischen einem Big Crunch und dem nächsten Urknall *überhaupt keine innere Zeit*, weil dort keine Entropie ausgetauscht wird, obwohl die Laboruhr weiterläuft. Über den gesamten Datensatz blieb die Gesamtentropie beider Sektoren zusammen innerhalb der Fehlergrenzen konstant, wie es ein geschlossenes System verlangt.
- **Verschiedene Regime erzeugen verschiedene „Zeiten“.** Erhöht man die Barriere, schrumpft der Entropieaustausch, sodass die innere Uhr langsamer läuft. Erhöht man sie bis zu dem Punkt, an dem die beiden Sektoren kaum noch miteinander kommunizieren, nähert sich der helle Sektor dem, was die Arbeit als „**Wärmetod**“ bezeichnet: einem stationären Zustand, in dem die entropische Zeit schlicht stehen bleibt.
- **Eine effektive Gleichung reproduziert die Daten.** Die Schrödinger-Gleichung in entropischer Zeit, gespeist mit den experimentellen Parametern, rekonstruiert numerisch die gemessene Entwicklung der Wolkenbreite. Die Arbeit berichtet eine ausgezeichnete Übereinstimmung für den Fall niedriger Barriere, in dem der entropiegetriebene Term dominiert; der explizite numerische Vergleich wird für diesen Fall durchgeführt.

Was das „Problem der Zeit“ und was „entropische Zeit“ hier bedeutet

Das Problem der Zeit besteht darin, dass die zentrale Gleichung der kanonischen Quantengravitation, die Wheeler-DeWitt-Gleichung, keine äußere Zeitvariable besitzt. Eine verbreitete Antwort ist *relational*: Eine physikalische Größe im System wird zur „Uhr“ erklärt, und alles andere relativ zu ihr beschrieben. Eine wiederkehrende Schwierigkeit ist, dass natürliche Uhrkandidaten nicht immer monoton sind – ein rekollabierendes System lässt die Kandidatenuhr erst vorwärts und dann rückwärts laufen –, sodass sie keine eindeutige Richtung von Anfang bis Ende beschriften können.

Entropische Zeit ist Barontinis Ausweg. Statt eine positionsartige Variable abzulesen, baut er die Uhr aus der zwischen beobachtetem und unbeobachtetem Sektor ausgetauschten *Entropie* und konstruiert sie so, dass sie nicht rückwärts läuft. Geistig ist sie eng mit älteren Ideen der „thermischen Zeit“ verwandt, wird hier aber operativ aus einem messbaren Entropiefluss statt aus abstrakter mathematischer Struktur definiert – genau das macht sie an einer realen Apparatur prüfbar.

Entscheidend ist: Die kosmologischen Wörter – „Urknall“, „Big Crunch“, „Skalenfaktor“, „Skalarfeld“, „Miniuniversum“ – sind **Analogbezeichnungen**. Sie benennen Eigenschaften eines gefangenen Atomgases, die den Gleichungen vereinfachter kosmologischer Modelle *strukturell ähneln*. Sie sind keine Aussagen über das tatsächliche Universum.

Was dies nicht beweist

Hier ist besondere Sorgfalt nötig, weil das Vokabular Übertreibungen einlädt.

- **Es löst das Problem der Zeit nicht und behauptet das auch nicht.** Die eigene Formulierung der Arbeit lautet, sie „etabliert eine kontrollierte experimentelle Umgebung, in der relationale Zeitkonstruktionen quantitativ geprüft werden können“. Ein Testbett ist kein Theorem. Ob relationale oder entropische Zeit die *richtige* Beschreibung der Zeit in der Quantengravitation ist, bleibt genauso offen wie zuvor.
- **Es ist ein Analogon, nicht das Universum.** Es wird keine Kosmologie beobachtet. Beobachtet wird ein Bose-Einstein-Kondensat in einer Falle, dessen reduzierte Beschreibung einem vereinfachten kosmologischen „Minisuperspace“-Modell *mathematisch ähnlich* ist. Diese Ähnlichkeit ist der Sinn des Experiments; sie ist zugleich seine Grenze. Nichts hier zeigt, dass das frühe Universum einen solchen Urknall hatte, dass die Raumzeit aus Atomen besteht oder dass „Zeit nicht existiert“.
- **Es zeigt nicht, dass Zeit „in Wahrheit“ Entropie ist.** Die entropische Uhr ist eine konstruierte Ordnung, die in diesem System gut funktioniert. Die Arbeit weist auf konzeptionelle Verwandtschaft mit der Thermal-Time-Hypothese hin, lässt aber ausdrücklich offen, ob beide überhaupt übereinstimmen. „Eine aus Entropie gebaute innere Uhr kann dieses Experiment ordnen“ ist eine erheblich engere Behauptung als „Zeit ist Entropie“.
- **Die effektive Gleichung ist ein Modellierungsergebnis, keine Neufassung der Quantenmechanik.** Die abgeleitete Schrödinger-Gleichung in entropischer Zeit geht bei langsamem Entropiefluss in gewöhnliche Quantenmechanik über und ist streng nur dann die übliche unitäre

Theorie, wenn überhaupt keine Entropie fließt. Die Arbeit positioniert sie als allgemeiner als die Standardgleichung *speziell dann, wenn ein beobachtetes System thermodynamisch zu einem unbeobachteten offen ist* – eine Aussage über offene Teilsysteme in einer solchen Anordnung, nicht darüber, dass die fundamentale Physik so neu geschrieben werden muss.

- **Es ist ein Experiment, ein Autor, eine Uhrenwahl.** Die Ergebnisse tragen ungefähr 5 % statistische Unsicherheit pro Punkt und stützen sich auf Mean-Field- und gemittelte Dichtenäherungen. Die gewählte Uhr und die Grobkörnigkeit sind bewusste Modellentscheidungen, die andere Gruppen untersuchen werden, bevor strukturelle Schlussfolgerungen gezogen werden.

Wie belastbar sind die Belege?

Für die bescheidene Behauptung, die tatsächlich aufgestellt wird, ist die Evidenz klar. Das System ist auf der relevanten Zeitskala wirklich gut isoliert, die Entropiebilanz schließt sich – Gesamtentropie innerhalb der Fehler konstant –, die innere Uhr ordnet die Daten fast überall monoton, und eine effektive Gleichung, die der Autor aus demselben Modell mit aus den Daten erschlossenen Parametern ableitet, reproduziert die gemessene Dynamik für den angewandten Fall niedriger Barriere. Die Daten sind offen verfügbar. Dies ist eine reale Messung eines realen, kontrollierbaren Systems, kein Gedankenexperiment.

Was sie tragen kann, ist entsprechend bescheiden. Alles ruht auf der Analogie zwischen dem reduzierten Kondensatmodell und der Minisuperspace-Kosmologie, und Analogien erhellen, ohne zu beweisen. Eine einzelne Plattform eines einzelnen Autors, die zeigt, dass ein Rezept für innere Zeit funktioniert, ist ein starker Machbarkeitsnachweis und eine schwache Grundlage für jede Behauptung darüber, wie sich Zeit in der Natur verhält. Die richtige Lesart lautet: Die Methode ist jetzt etwas, das man im Labor *tun* und prüfen kann.

Warum es wichtig ist

Debatten über das Problem der Zeit stecken seit Langem auf der Ebene des Formalismus fest, wo konkurrierende Vorschläge schwer zu falsifizieren sind, weil sie nur wenige konkrete, messbare Vorhersagen machen. Selbst einen kleinen Teil dieser Debatte in ein ausführbares Experiment zu verwandeln – in dem eine innere Uhr die Daten entweder ordnet oder nicht, eine effektive Gleichung passt oder nicht – verändert den Charakter der Auseinandersetzung. Es gibt Theoretikern eine Werkbank, auf der sie ihre Werkzeuge prüfen können.

Das ist der eigentliche Beitrag: keine Antwort über die Zeit, sondern ein **Ort, an dem sich die Frage quantitativ stellen lässt**. Kaltatomplattformen dienten bereits als kontrollierbare Analoga für Hawking-Strahlung, expandierende Universen und Zerfall des falschen Vakuums; diese Arbeit fügt relationale Zeit und den Zeitpfeil zum Werkzeugkasten hinzu. Der Wert liegt in den Folgeexperimenten, die dadurch möglich werden – andere Uhrenwahlen, hüpfendes gegenüber singulärem Verhalten, Tests der Reversibilität –, nun jeweils als Messung und nicht nur als

Rechnung.

Kurz zusammengefasst

Ein Physiker erzeugte ein Bose-Einstein-Kondensat, teilte es mit einer dünnen optischen Barriere in eine beobachtete und eine unbeobachtete Hälfte und verwendete die zwischen beiden Hälften fließende Entropie, um eine innere „entropische Zeit“ zu konstruieren. Diese Uhr ordnet den Expansions- und Rekollapszyklus der beobachteten Hälfte, läuft schnell bei Entropieaustausch und hält an, wenn keiner stattfindet. Eine in dieser inneren Zeit geschriebene effektive Gleichung reproduziert die Messdaten im untersuchten Fall niedriger Barriere. Die Anordnung ist ein Analogon des „Problems der Zeit“ aus der kanonischen Quantengravitation: „Urknall“, „Big Crunch“ und „Miniuniversum“ sind Bezeichnungen für ein gefangenes Gas, das einem vereinfachten kosmologischen Modell mathematisch ähnelt. Es ist ein kontrolliertes Testbett für relationale Zeitideen – keine Lösung des Zeitproblems, keine Behauptung über das reale Universum und kein Beleg dafür, dass Zeit „in Wahrheit“ Entropie ist.

Nüchtern geprüft

Was die Arbeit zeigt: In einem gut isolierten Kaltatomsystem kann eine aus Entropieaustausch definierte innere Uhr die beobachtete Dynamik monoton ordnen, und eine effektive Gleichung in „entropischer Zeit“ reproduziert im untersuchten Fall niedriger Barriere die gemessene Entwicklung.

Was plausibel, aber nicht gezeigt ist: Dass entropische oder relationale Zeit eine gute Beschreibung der Zeit in realer Quantengravitation ist. Das Experiment ist damit vereinbar, solche Konstruktionen ernst zu nehmen; es bestätigt sie nicht für die Natur.

Was sie nicht zeigt: Dass das Problem der Zeit gelöst ist; dass Quantengravitation gelöst ist; dass das Universum mit einem Urknall dieser Art begann; dass Raumzeit aus Atomen emergiert; oder dass „Zeit nicht existiert“.

Wichtigste Einschränkungen: Eine einzelne Plattform, ein einzelner Autor und eine einzelne Uhrenwahl; ungefähr 5 % Unsicherheit pro Punkt; Mean-Field- und gemittelte Dichtenäherungen; und vor allem die Abhängigkeit von einer Analogie zwischen einem gefangenen Kondensat und einem vereinfachten kosmologischen Modell.

Wie viel Vertrauen sollte ein allgemeines Publikum haben? Hohes Vertrauen darin, dass das Experiment in seinem eigenen System das Berichtete geleistet hat. Geringes Vertrauen in jeden Sprung von diesem Analogon zu Aussagen über Zeit im realen Universum.

Quellen

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