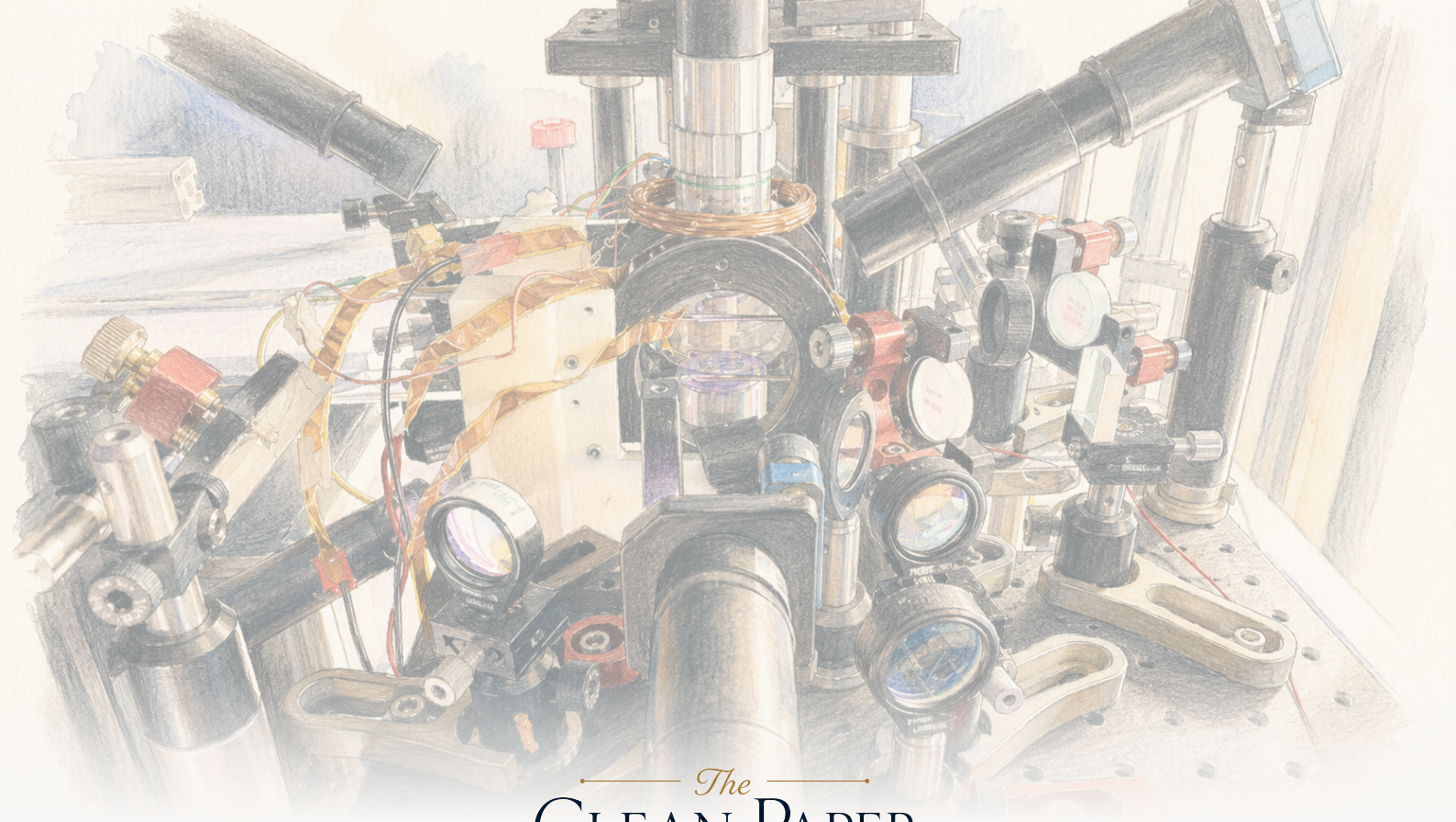

The Clean Paper

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

Doświadczenie z zimnymi atomami testuje „problem czasu” grawitacji kwantowej — jako analog laboratoryjny, nie odpowiedź

W kanonicznej grawitacji kwantowej równanie Wheelera–DeWitta nie zawiera zewnętrznego zegara porządkującego zdarzenia: to „problem czasu”. Jednoautorskie doświadczenie izoluje kondensat Bosego–Einsteina, dzieli go cienką barierą optyczną na sektor obserwowany i nieobserwowany, a następnie buduje wewnętrzny zegar z entropii przepływającej między nimi. Ten „czas entropijny” porządkuje rozszerzanie i ponowne zapadanie obserwowanego sektora, a efektywne równanie odtwarza zmierzone dane w zbadanym przypadku niskiej bariery. Jest to kontrolowane stanowisko testowe dla idei czasu relacyjnego: „wielki wybuch”, „wielki kolaps” i „miniwszechświat” są analogowymi nazwami uwięzionego gazu, nie rzeczywistą kosmologią, a praca nie twierdzi, że rozwiązuje problem czasu lub grawitację kwantową.

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

Zegar zbudowany z entropii, wewnątrz pułapki

W kanonicznej grawitacji kwantowej istnieje dziwna i uporczywa zagadka: centralne równanie nie zawiera czasu. Równanie Wheelera–DeWitta, najbliższy odpowiednik równania Schrödingera dla całego wszechświata, mówi po prostu, że pewien operator działający na stan daje zero. Nie ma zewnętrznego parametru, który tykałby i porządkował „przed" oraz „po" — a jednak wyraźnie doświadczamy upływu czasu. To **problem czasu**, który od ponad pół wieku opiera się rozwiązaniu.

Jednoautorska praca w *Physical Review Research* go nie rozwiązuje. Robi coś cichszego i na swój sposób bardziej użytecznego: buduje mały, dobrze kontrolowany układ laboratoryjny, w którym jedną rodzinę proponowanych odpowiedzi można **sprawdzić na rzeczywistych danych**. Giovanni Barontini z University of Birmingham bierze kondensat Bosego–Einsteina — chmurę ultrazimnych atomów zachowującą się jak jeden obiekt kwantowy — i zmienia ją w analog, na którym ideę „wewnętrznego", relacyjnego czasu można mierzyć, zamiast tylko o niej dyskutować. Sztuczka polega na zbudowaniu zegara nie z zewnętrznego stopera, lecz z entropii, którą układ przemieszcza wewnątrz siebie.

Odległość między „kontrolowanym analogiem problemu czasu" a „fizycy rozwiązali czas" jest całą historią tej pracy — i jest to odległość bardzo duża.

Co zrobił badacz

Aparatura zawiera kondensat około **24 000 atomów rubidu-87** utrzymywanych w zachowawczej optycznej pułapce dipolowej i wprawianych w oscylacje — cała chmura atomowa przemieszcza się tam i z powrotem przez pułapkę. **Cienka bariera optyczna** — szeroka na około 8 mikrometrów, „namalowana" światłem o długości fali 675 nm za pomocą cyfrowego urządzenia mikroluster — dzieli pułapkę na dwie połowy. Jedna jest obserwowana — „**sektor jasny**" — druga nie — „**sektor ciemny**". W około 100-milisekundowym oknie doświadczenia układ nie wykazuje mierzalnej utraty cząstek ani dyssypacji, dlatego z dobrym przybliżeniem jest układem zamkniętym z hamiltonianem, który sam nie zależy od czasu.

[figure_pair pending]

Po lewej pułapka magnetooptyczna wytwarza zimną chmurę atomów rubidu wewnątrz szklanej komory: jest to wczesny etap chłodzenia prowadzący do przygotowania kondensatu. Po prawej Giovanni Barontini stoi obok aparatury optycznej. Są to fotografie układu laboratoryjnego stojącego za doświadczeniem, a nie obrazy dosłownego miniaturowego wszechświata.

Obserwowany zwykłym zegarem laboratoryjnym — obraz absorpcyjny co 2 ms — sektor jasny robi coś sugestywnego. Atomy przepływają przez barierę, a sektor rośnie od zera — Barontini nazywa ten moment „**wielkim wybuchem**" — osiąga maksymalny zasięg, po czym kurczy się i opróżnia z powrotem do strony ciemnej — „**wielkiego kolapsu**". Zależnie od wysokości bariery cykl może się powtarzać.

Następnie pojawia się właściwy problem. Zegar laboratoryjny jest *zewnętrzny* wobec układu — dokład-

nie takim elementem, którego ustawienie Wheelera–DeWitta nie dopuszcza. Barontini pyta więc: czy historię sektora jasnego można **uporządkować wyłącznie za pomocą wielkości wewnętrznych dla układu**? Odpowiedzią jest zegar nazwany przez niego **czasem entropijnym**, odczytywany bezpośrednio z tych samych obrazów w trzech prostych krokach. Po pierwsze, z każdego obrazu absorpcyjnego wyodrębnia cztery liczby dla sektora jasnego: liczbę atomów, środek masy profilu gęstości — pełniący rolę analogowego „pola skalarnego" — szerokość oraz entropię, czyli entropię na atom wyznaczoną standardową metodą i pomnożoną przez liczbę atomów. Po drugie, gdy atomy przekraczają barierę, entropia rośnie i maleje. Po trzecie, zegar śledzi gradient entropii wzdłuż zmierzonej drogi środka masy, licząc wartość każdego przemieszczenia, a nie jego kierunek. Gdy entropia i środek masy rosną lub maleją razem, każdy krok przesuwa zegar naprzód nawet wtedy, gdy chmura zawraca. W danych daje to niemal wszędzie jednoznaczne uporządkowanie od „wielkiego wybuchu" sektora do jego „wielkiego kolapsu", z kilkoma niewielkimi wahaniami tam, gdzie rzadkie próbkowanie sprawia, że te dwie zmiany się rozchodzą.

Na końcu autor wyprowadza efektywne **„równanie Schrödingera w czasie entropijnym"** — równanie ewolucji sektora jasnego zapisane za pomocą tego wewnętrznego zegara zamiast zewnętrznego — i rozwiązuje je numerycznie, by sprawdzić, czy odtwarza to, co rzeczywiście zarejestrowała kamera.

Co wykazał

Trzy wyniki, rosnące pod względem ambicji.

- **Wewnętrzny zegar działa jako porządek.** Czas entropijny rośnie monotonicznie niemal wszędzie, a jego tempo wyznacza szybkość przepływu entropii przez barierę: biegnie szybciej, gdy entropia jest wymieniana, i **całkowicie zatrzymuje się, gdy wymiany nie ma**. W odwracalnym reżimie niskiej bariery *żaden czas wewnętrzny nie upływa* między wielkim kolapsem a następnym wielkim wybuchem, ponieważ nie ma wtedy wymiany entropii — mimo że zegar laboratoryjny nadal tyka. W całym zestawie danych łączna entropia obu sektorów pozostawała stała w granicach błędu, zgodnie z wymogiem dla układu zamkniętego.
- **Różne reżimy dają różne „czasy".** Podniesienie bariery zmniejsza wymianę entropii, więc wewnętrzny zegar zwalnia. Gdy bariera rośnie do punktu, w którym oba sektory prawie się nie komunikują, sektor jasny zbliża się do tego, co praca nazywa „**śmiercią cieplną**": stanu stacjonarnego, w którym czas entropijny po prostu się zatrzymuje.
- **Efektywne równanie odtwarza dane.** Równanie Schrödingera w czasie entropijnym, zasilone parametrami doświadczenia, numerycznie odtwarza mierzoną ewolucję szerokości chmury. Praca podaje znakomitą zgodność dla przypadku niskiej bariery, w którym dominuje składnik napędzany entropią; jawne porównanie liczbowe wykonano właśnie dla tego przypadku.

> **Czym są „problem czasu" i „czas entropijny" w tej pracy**
>
> **Problem czasu** polega na tym, że główne równanie kanonicznej grawitacji kwantowej — równanie Wheelera–DeWitta — nie zawiera zewnętrznej zmiennej czasu. Częstą odpowiedzią

jest podejście *relacyjne*: wybrać jedną wielkość fizyczną wewnątrz układu jako „zegar” i opisywać wszystko inne względem niej. Powracającą trudnością jest to, że naturalne wybory zegara nie zawsze są monotoniczne — w układzie zapadającym się ponownie kandydat na zegar biegnie naprzód, a potem wstecz — przez co nie może jednoznacznie wyznaczyć jednego kierunku od początku do końca.
Czas entropijny jest sposobem Barontiniego na obejście tego problemu. Zamiast odczytywać zmienną podobną do położenia, buduje zegar z *entropii* wymienianej między sektorem obserwowanym i nieobserwowanym, konstruując go tak, by się nie cofał. W duchu jest blisko starszych idei „czasu termicznego”, ale tutaj zostaje zdefiniowany operacyjnie na podstawie mierzalnego przepływu entropii, a nie abstrakcyjnej struktury matematycznej — i właśnie dlatego można go testować na rzeczywistej aparaturze.
Co kluczowe, słowa kosmologiczne — „wielki wybuch”, „wielki kolaps”, „czynnik skali”, „pole skalarne”, „miniwszechświat” — są **etykietami analogii**. Nazywają cechy uwięzionego gazu atomowego, które są *strukturalnie podobne* do równań uproszczonych modeli kosmologicznych. Nie są twierdzeniami o rzeczywistym wszechświecie.

Czego to nie dowodzi

Tutaj ostrożność jest najważniejsza, ponieważ użyte słownictwo zachęca do przesady.

- **Nie rozwiązuje problemu czasu i nie twierdzi, że go rozwiązuje.** Sama praca przedstawia się jako ustanowienie „kontrolowanego środowiska eksperymentalnego, w którym konstrukcje czasu relacyjnego można testować ilościowo”. Stanowisko testowe nie jest twierdzeniem matematycznym. Pytanie, czy czas relacyjny lub entropijny jest *właściwym* opisem czasu w grawitacji kwantowej, pozostaje dokładnie tak otwarte jak wcześniej.
- **To analog, nie wszechświat.** Nie obserwuje się kosmologii. Obserwuje się kondensat Bosego–Einsteina w pułapce, którego zredukowany opis jest *matematycznie podobny* do uproszczonego modelu kosmologicznego typu minisuperspace. Podobieństwo jest sednem doświadczenia, ale również jego granicą. Nic tutaj nie pokazuje, że wczesny wszechświat miał taki wielki wybuch, że czasoprzestrzeń jest zbudowana z atomów ani że „czas nie istnieje”.
- **Nie pokazuje, że czas „naprawdę” jest entropią.** Zegar entropijny jest jedną skonstruowaną miarą porządku, dobrze działającą w tym układzie. Praca zauważa pokrewieństwo pojęciowe z hipotezą czasu termicznego, ale wyraźnie pozostawia otwarte nawet pytanie, czy oba pojęcia są równoważne. „Wewnętrzny zegar zbudowany z entropii może uporządkować to doświadczenie” jest twierdzeniem znacznie węższym niż „czas jest entropią”.
- **Efektywne równanie jest wynikiem modelowania, nie przepisaniem mechaniki kwantowej.** Wyprowadzone równanie Schrödingera w czasie entropijnym redukuje się do zwykłej mechaniki kwantowej, gdy przepływ entropii jest powolny, a ściśle odpowiada zwykłej teorii unitarnej tylko wtedy, gdy entropia w ogóle nie płynie. Praca przedstawia je jako bardziej ogólne od równania standardowego *konkretnie wtedy, gdy obserwowany układ jest termodynamicznie otwarty na nieobserwowany* — jest to stwierdzenie o otwartych podukładach w tego rodzaju ustawieniu, a

nie o konieczności przepisania fundamentalnej fizyki.

- **To jedno doświadczenie, jeden autor i jeden wybór zegara.** Wyniki mają około 5% niepewności statystycznej na punkt i opierają się na przybliżeniu pola średniego oraz uśrednionej gęstości. Wybrany zegar i gruboziarnistość opisu są świadomymi decyzjami modelowymi, które inne grupy będą chciały sprawdzić przed wyciągnięciem wniosków strukturalnych.

Jak mocne są dowody

Dla skromnego twierdzenia, które praca rzeczywiście formułuje, dowody są mocne i przejrzyste. Układ jest naprawdę dobrze odizolowany w odpowiedniej skali czasu, bilans entropii się domyka — łączna entropia pozostaje stała w granicach błędu — zegar wewnętrzny porządkuje dane monotonicznie niemal wszędzie, a efektywne równanie, wyprowadzone przez autora z tego samego modelu i z parametrami wnioskowanymi z danych, odtwarza mierzoną dynamikę w przypadku niskiej bariery, do którego je zastosowano. Dane są publicznie dostępne. To prawdziwy pomiar rzeczywistego, kontrolowalnego układu, a nie eksperyment myślowy.

Ciężar, jaki można na nim oprzeć, jest odpowiednio skromny. Wszystko zależy od analogii między zredukowanym modelem kondensatu a kosmologią minisuperspace, a analogie pomagają rozumieć, lecz nie dowodzą. Jedna platforma, jeden autor i wykazanie, że jeden przepis na czas wewnętrzny działa, stanowią mocny dowód zasady i słabą podstawę do twierdzeń o zachowaniu czasu w naturze. Najwłaściwszy wniosek jest skromniejszy: metodę można teraz *zrealizować* w laboratorium i sprawdzić.

Dlaczego to ma znaczenie

Dyskusje o problemie czasu od dawna tkwią na poziomie formalizmu, gdzie konkurencyjne propozycje trudno sfalsyfikować, ponieważ dają niewiele konkretnych, mierzalnych przewidywań. Zamiana choćby fragmentu tej debaty w doświadczenie, które można przeprowadzić — gdzie zegar wewnętrzny albo porządkuje dane, albo nie, a efektywne równanie albo pasuje, albo nie — zmienia charakter sporu. Daje teoretykom stanowisko laboratoryjne do testowania ich narzędzi.

To jest rzeczywisty wkład: nie odpowiedź na pytanie o czas, lecz **miejsce, w którym można zadać je ilościowo**. Platformy zimnych atomów służyły już jako kontrolowalne analogi promieniowania Hawkinga, rozszerzających się wszechświatów i rozpadu fałszywej próżni; ta praca dodaje do zestawu czas relacyjny i strzałkę czasu. Wartość tkwi w dalszych badaniach, które umożliwia — innych wyborach zegara, zachowaniu odbijającym zamiast osobliwego, testach odwracalności — z których każde staje się teraz pomiarem, a nie wyłącznie obliczeniem.

Zwięzłe podsumowanie

Fizyk zbudował kondensat Bosego–Einsteina, podzielił go cienką barierą optyczną na obserwowaną i nieobserwowaną połowę, a następnie wykorzystał entropię przepływającą między nimi do skonstruowania wewnętrznego „czasu entropijnego”. Zegar ten porządkuje cykl rozszerzania i ponownego zapadania obserwowanej połowy, biegnąc szybko podczas wymiany entropii i zatrzymując się, gdy jej nie ma, a efektywne równanie zapisane w tym czasie odtwarza zmierzone dane w zbadanym przypadku niskiej bariery. Ustawienie jest analogiem „problemu czasu” z kanonicznej grawitacji kwantowej: „wielki wybuch”, „wielki kolaps” i „miniwszechświat” są etykietami uwięzionego gazu matematycznie podobnego do uproszczonego modelu kosmologicznego. Jest to kontrolowane stanowisko testowe dla idei czasu relacyjnego — nie rozwiązanie problemu czasu, nie twierdzenie o rzeczywistym wszechświecie i nie dowód, że czas jest „naprawdę” entropią.

Kontrola bez upiększeń

Co pokazuje praca: W jednym dobrze odizolowanym układzie zimnych atomów wewnętrzny zegar zdefiniowany na podstawie wymiany entropii może monotonicznie uporządkować obserwowaną dynamikę, a efektywne równanie „czasu entropijnego” odtwarza zmierzoną ewolucję w zbadanym przypadku niskiej bariery.

Co jest wiarygodne, ale niepokazane: Że czas entropijny lub relacyjny jest dobrym opisem czasu w rzeczywistej grawitacji kwantowej. Doświadczenie jest zgodne z poważnym traktowaniem takich konstrukcji; nie potwierdza ich dla natury.

Czego praca nie pokazuje: Że problem czasu został rozwiązany; że rozwiązano grawitację kwantową; że wszechświat rozpoczął się od wielkiego wybuchu tego rodzaju; że czasoprzestrzeń wyłania się z atomów; ani że „czas nie istnieje”.

Główne ograniczenia: Jedna platforma, jeden autor i jeden wybór zegara; około 5% niepewności na punkt; przybliżenia pola średniego i uśrednionej gęstości; a przede wszystkim oparcie na analogii między uwięzionym kondensatem a uproszczonym modelem kosmologicznym.

Jak duże zaufanie powinien mieć ogólny czytelnik? Wysokie do tego, że doświadczenie zrobiło to, co opisuje, we własnym układzie. Niskie do każdego przeskoku od tego analogu do twierdzeń o czasie w rzeczywistym wszechświecie.

Źródła

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