The Clean Paper

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

Experiment s chladnými atomy testuje „problém času“ kvantové gravitace — jako laboratorní analog, ne odpověď

V kanonické kvantové gravitaci nemá Wheelerova-DeWittova rovnice vnější hodiny, které by řadily události: to je „problém času“. Experiment jediného autora izoluje Boseho-Einsteinův kondenzát, rozděluje jej tenkou optickou bariérou na nepozorovaný a pozorovaný sektor a z entropie proudící mezi nimi staví vnitřní hodiny. Tento „entropický čas“ uspořádává rozpínání a opětovné smrštění pozorovaného sektoru a účinná rovnice reprodukuje změřená data v analyzovaném případě nízké bariéry. Jde o kontrolované testovací prostředí relačního času: „velký třesk“, „velký krach“ a „minivesmír“ jsou analogové názvy pro zachycený plyn, nikoli skutečná kosmologie, a práce netvrdí, že vyřešila problém času nebo kvantovou gravitaci.

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

Hodiny postavené z entropie uvnitř pasti

V kanonické kvantové gravitaci existuje zvláštní a vytrvalá hádanka: v ústřední rovnici není čas. Wheelerova-DeWittova rovnice, nejbližší obdoba Schrödingerovy rovnice pro celý vesmír, pouze říká, že určitý operátor působící na stav dává nulu. Neexistuje žádný vnější parametr, který tiká, nic, co by řadilo „před“ a „po“ — přesto zjevně zažíváme plynutí času. To je **problém času**, který odolává řešení déle než půl století.

Článek jediného autora v *Physical Review Research* jej neřeší. Dělá něco tiššího a svým způsobem užitečnějšího: vytváří malý, dobře kontrolovaný laboratorní systém, v němž lze jednu rodinu navrhovaných odpovědí **otestovat na skutečných datech**. Giovanni Barontini z University of Birmingham používá Boseho-Einsteinův kondenzát — oblak ultrachladných atomů chovající se jako jediný kvantový objekt — a mění jej v analog, na němž lze myšlenku „vnitřního“, relačního času měřit místo pouhého diskutování. Trik spočívá v tom, že hodiny nevytvoří z vnějších stopek, ale z entropie, kterou systém přesouvá uvnitř sebe.

Vzdálenost mezi „kontrolovaným analogem problému času“ a „fyzikové vyřešili čas“ je celý příběh — a je velmi dlouhá.

Co výzkumník udělal

Zařízení tvoří kondenzát přibližně **24 000 atomů rubidia-87** držených v konzervativní optické dipólové pasti a uvedených do kmitání — celý atomový oblak se přelévá tam a zpět napříč pastí. **Tenká optická bariéra** — široká zhruba 8 mikrometrů, vykreslená světlem o vlnové délce 675 nm pomocí digitálního mikrozrcadlového zařízení — rozděluje past na dvě poloviny. Jedna polovina je pozorována („**světlý sektor**“), druhá nikoli („**temný sektor**“). Během přibližně 100milisekundového okna experimentu systém nevykazuje měřitelnou ztrátu částic ani disipaci, takže je s dobrou aproximací uzavřeným systémem s Hamiltoniánem, který sám na čase nezávisí.

[figure_pair pending]

Vlevo magnetooptická past vytváří chladný oblak atomů rubidia ve skleněné komoře: ranou fázi chlazení na cestě k přípravě kondenzátu. Vpravo stojí Giovanni Barontini vedle optické aparatury. Jde o fotografie laboratorního systému použitého v experimentu, nikoli snímky doslovného miniaturního vesmíru.

Při sledování běžnými laboratorními hodinami — absorpčním snímkem každé 2 ms — dělá světlý sektor něco sugestivního. Atomy proudí přes bariéru a sektor roste z ničeho (Barontini tento okamžik označuje jako „**velký třesk**“), dosáhne největšího rozsahu, poté se smrští a vyprázdní zpět do temné strany („**velký krach**“). Podle výšky bariéry se může cyklus opakovat.

Potom přichází skutečný smysl práce. Laboratorní hodiny jsou vůči systému *vnější* — právě takový prvek Wheelerovo-DeWittovo prostředí zakazuje. Barontini se proto ptá: lze historii světlého sektoru **seřadit pouze pomocí veličin uvnitř systému**? Jeho odpovědí jsou hodiny nazvané **entropický čas**, odečtené přímo ze stejných snímků ve třech prostých krocích. Za prvé z každého absorpčního snímku

získá pro světlý sektor čtyři čísla: počet atomů, těžiště profilu hustoty (které zastupuje analogové „skalární pole“), šířku a entropii — entropii na atom, získanou standardní metodou, vynásobenou počtem atomů. Za druhé, jak atomy překračují bariéru, entropie roste a klesá. Za třetí hodiny sledují gradient entropie podél změřené dráhy těžiště a počítají velikost každého posunu bez ohledu na jeho směr. Když entropie a těžiště společně rostou nebo klesají, každý krok posouvá hodiny dopředu i tehdy, když oblak změní směr. V datech tak vzniká téměř všude jednoznačné pořadí od „velkého třesku“ sektoru po jeho „velký krach“, pouze s několika drobnými zákmity tam, kde hrubé vzorkování způsobí nesoulad obou změn.

Nakonec autor odvozuje účinnou **„Schrödingerovu rovnici v entropickém čase“** — evoluční rovnici pro světlý sektor napsanou pomocí těchto vnitřních hodin místo vnějších — a numericky ji řeší, aby zjistil, zda reprodukuje to, co kamera skutečně zaznamenala.

Co zjistil

Tři výsledky v rostoucím pořadí ambicí.

- **Vnitřní hodiny fungují jako uspořádání.** Entropický čas téměř všude monotónně roste a jeho rychlost určuje rychlost přenosu entropie přes bariéru: běží rychleji, když se entropie vyměňuje, a **zcela se zastaví, když se nevyměňuje žádná**. V reverzibilním režimu s nízkou bariérou *neuplyne žádný vnitřní čas* mezi velkým krachem a následujícím velkým třeskem — protože se tam nepřenáší entropie — přestože laboratorní hodiny dál tikají. V celém souboru dat zůstala celková entropie obou sektorů dohromady v mezích chyb konstantní, jak se od uzavřeného systému vyžaduje.
- **Různé režimy dávají různé „časy“.** Zvýšení bariéry zmenšuje výměnu entropie, takže vnitřní hodiny běží pomaleji. Když se bariéra zvýší natolik, že oba sektory téměř nekomunikují, světlý sektor se blíží tomu, co článek nazývá „**tepelnou smrtí**“: stacionárnímu stavu, v němž se entropický čas jednoduše zastaví.
- **Účinná rovnice reprodukuje data.** Schrödingerova rovnice v entropickém čase, do níž jsou vloženy experimentální parametry, numericky obnovuje změřený vývoj šířky oblaku. Článek uvádí vynikající shodu pro případ nízké bariéry, kde převládá člen řízený entropií; výslovné numerické porovnání je provedeno právě pro tento případ.

Co je „problém času“ a co je zde „entropický čas“

Problém času spočívá v tom, že hlavní rovnice kanonické kvantové gravitace (Wheelerova-DeWittova) nemá vnější časovou proměnnou. Běžnou odpovědí je *relační* přístup: povýšit jednu fyzikální veličinu uvnitř systému na „hodiny“ a popsat vše ostatní vzhledem k ní. Opakovaným problémem je, že přirozené kandidáty na hodiny nejsou vždy monotónní — znovu se smršťující systém vede kandidátní hodiny dopředu a potom zpět — a proto nedokážou jednoznačně označit směr od začátku do konce.
Entropický čas je Barontiniho způsob, jak tento problém obejít. Místo odečítání veličiny

> podobné poloze staví hodiny z *entropie* vyměněné mezi pozorovaným a nepozorovaným sektorem a konstruuje je tak, aby se neobracely. Myšlenkově souvisí se staršími představami „tepelného času“, zde je však definován operačně z měřitelného toku entropie, nikoli z abstraktní matematické struktury — právě proto jej lze testovat ve skutečné aparatuře.
> Zásadní je, že kosmologická slova — „velký třesk“, „velký krach“, „škálový faktor“, „skalární pole“, „minivesmír“ — jsou **analogové názvy**. Označují rysy zachyceného plynu atomů, které jsou *strukturálně podobné* rovnicím zjednodušených kosmologických modelů. Nejsou tvrzeními o skutečném vesmíru.

Co to neprokazuje

Zde je opatrnost nejdůležitější, protože slovník svádí k přehánění.

- **Neřeší problém času a ani to netvrdí.** Vlastní formulace článku říká, že „zakládá kontrolované experimentální prostředí, v němž lze konstrukce relačního času kvantitativně testovat“. Testovací prostředí není teorém. Otázka, zda je relační či entropický čas *správným* popisem času v kvantové gravitaci, zůstává stejně otevřená jako předtím.
- **Je to analog, ne vesmír.** Není pozorována žádná kosmologie. Pozoruje se Boseho-Einsteinův kondenzát v pasti a jeho redukovaný popis je *matematicky podobný* zjednodušenému kosmologickému modelu („minisuperspace“). Podobnost je smyslem experimentu i jeho hranicí. Nic zde neukazuje, že raný vesmír měl takový velký třesk, že prostoročas tvoří atomy nebo že „čas neexistuje“.
- **Neukazuje, že čas je „ve skutečnosti“ entropie.** Entropické hodiny jsou jedním zkonstruovaným uspořádáním, které na tomto systému dobře funguje. Článek upozorňuje na koncepční příbuznost s hypotézou tepelného času, ale výslovně ponechává otevřené, zda se vůbec shodují. „Vnitřní hodiny z entropie mohou uspořádat tento experiment“ je mnohem užší tvrzení než „čas je entropie“.
- **Účinná rovnice je modelový výsledek, ne přepis kvantové mechaniky.** Odvozená Schrödingerova rovnice v entropickém čase přechází k běžné kvantové mechanice při pomalém toku entropie a je striktně obvyklou unitární teorií pouze tehdy, když žádná entropie neproudí. Článek ji staví jako obecnější než standardní rovnici *konkrétně tehdy, když je pozorovaný systém termodynamicky otevřený vůči nepozorovanému* — jde o tvrzení o otevřených podsystémech v tomto typu zařízení, nikoli o požadavek přepsat tímto způsobem fundamentální fyziku.
- **Je to jeden experiment, jeden autor a jedna volba hodin.** Výsledky nesou přibližně 5% statistickou nejistotu na bod a spoléhají na aproximaci středního pole a zprůměrované hustoty. Zvolené hodiny a hrubé zrnění jsou záměrná modelová rozhodnutí, která budou chtít další skupiny prozkoumat před vyvozováním strukturálních závěrů.

Jak silné jsou důkazy

Pro skromné tvrzení, které práce skutečně předkládá, jsou důkazy přesvědčivé. Systém je na relevantní časové škále skutečně dobře izolovaný, bilance entropie se uzavírá (celková entropie je v mezích chyb konstantní), vnitřní hodiny uspořádávají data téměř všude monotónně a účinná rovnice, kterou autor odvodil ze stejného modelu s parametry získanými z dat, reprodukuje změřenou dynamiku pro případ nízké bariéry, na nějž byla použita. Data jsou veřejně dostupná. Jde o skutečné měření skutečného, ovladatelného systému, nikoli myšlenkový experiment.

Váha, kterou unese, je odpovídajícím způsobem skromná. Vše spočívá na analogii mezi redukovaným modelem kondenzátu a kosmologií minisuperspace a analogie osvětlují, ale nedokazují. Jedna platforma od jediného autora, která ukazuje funkčnost jednoho receptu vnitřního času, je silným důkazem principu a slabým základem pro jakékoli tvrzení o chování času v přírodě. Správné čtení zní: metodu lze nyní *provést* v laboratoři a zkontrolovat.

Proč na tom záleží

Debaty o problému času dlouho uvízly na úrovni formalismu, kde se konkurenční návrhy obtížně vyvracejí, protože vytvářejí málo konkrétních měřitelných předpovědí. Přeměna byť jen části debaty na proveditelný experiment — kde vnitřní hodiny buď data uspořádají, nebo ne, a kde účinná rovnice buď sedí, nebo ne — mění povahu argumentu. Dává teoretikům laboratorní lavici, na níž mohou své nástroje zkoušet.

To je skutečný přínos: ne odpověď o čase, ale **místo, kde lze otázku klást kvantitativně**. Platformy s chladnými atomy už sloužily jako ovladatelné analogy Hawkingova záření, rozpínajících se vesmírů a rozpadu falešného vakua; tato práce do sady přidává relační čas a šipku času. Hodnota spočívá v následných experimentech, které umožňuje — jiné volby hodin, odrazové versus singulární chování, testy vratnosti — nyní jako měření, ne jen výpočty.

Stručné shrnutí

Fyzik vytvořil Boseho-Einsteinův kondenzát, rozdělil jej tenkou optickou bariérou na pozorovanou a nepozorovanou polovinu a z entropie proudící mezi nimi sestavil vnitřní „entropický čas“. Tyto hodiny uspořádávají cyklus rozpínání a opětovného smrštění pozorované poloviny, běží rychle při výměně entropie a zastavují se, když výměna neprobíhá. Účinná rovnice napsaná v tomto vnitřním čase reprodukuje změřená data pro zkoumaný případ nízké bariéry. Zařízení je analogem „problému času“ z kanonické kvantové gravitace: „velký třesk“, „velký krach“ a „minivesmír“ jsou názvy pro zachycený plyn matematicky podobný zjednodušenému kosmologickému modelu. Jde o kontrolované testovací prostředí pro myšlenky relačního času — ne řešení problému času, ne tvrzení o skutečném vesmíru a ne důkaz, že čas je „ve skutečnosti“ entropie.

Kontrola bez příkras

Co článek ukazuje: V jednom dobře izolovaném systému chladných atomů mohou vnitřní hodiny definované výměnou entropie monotónně uspořádat pozorovanou dynamiku a účinná rovnice „entropického času“ reprodukuje změřený vývoj v analyzovaném případě nízké bariéry.

Co je věrohodné, ale neukázané: Že entropický či relační čas dobře popisuje čas ve skutečné kvantové gravitaci. Experiment podporuje vážné zkoumání těchto konstrukcí, nepotvrzuje je však pro přírodu.

Co článek neukazuje: Že byl problém času vyřešen; že byla vyřešena kvantová gravitace; že vesmír začal takovým velkým třeskem; že prostoročas emerguje z atomů; ani že „čas neexistuje“.

Hlavní omezení: Jedna platforma, jeden autor a jedna volba hodin; přibližně 5% nejistota na bod; aproximace středního pole a zprůměrované hustoty; a především závislost na analogii mezi zachyceným kondenzátem a zjednodušeným kosmologickým modelem.

Jak velkou důvěru by měl mít běžný čtenář? Vysokou důvěru, že experiment na vlastním systému provedl to, co uvádí. Nízkou důvěru v jakýkoli skok od tohoto analogu k tvrzením o čase ve skutečném vesmíru.

Zdroje

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