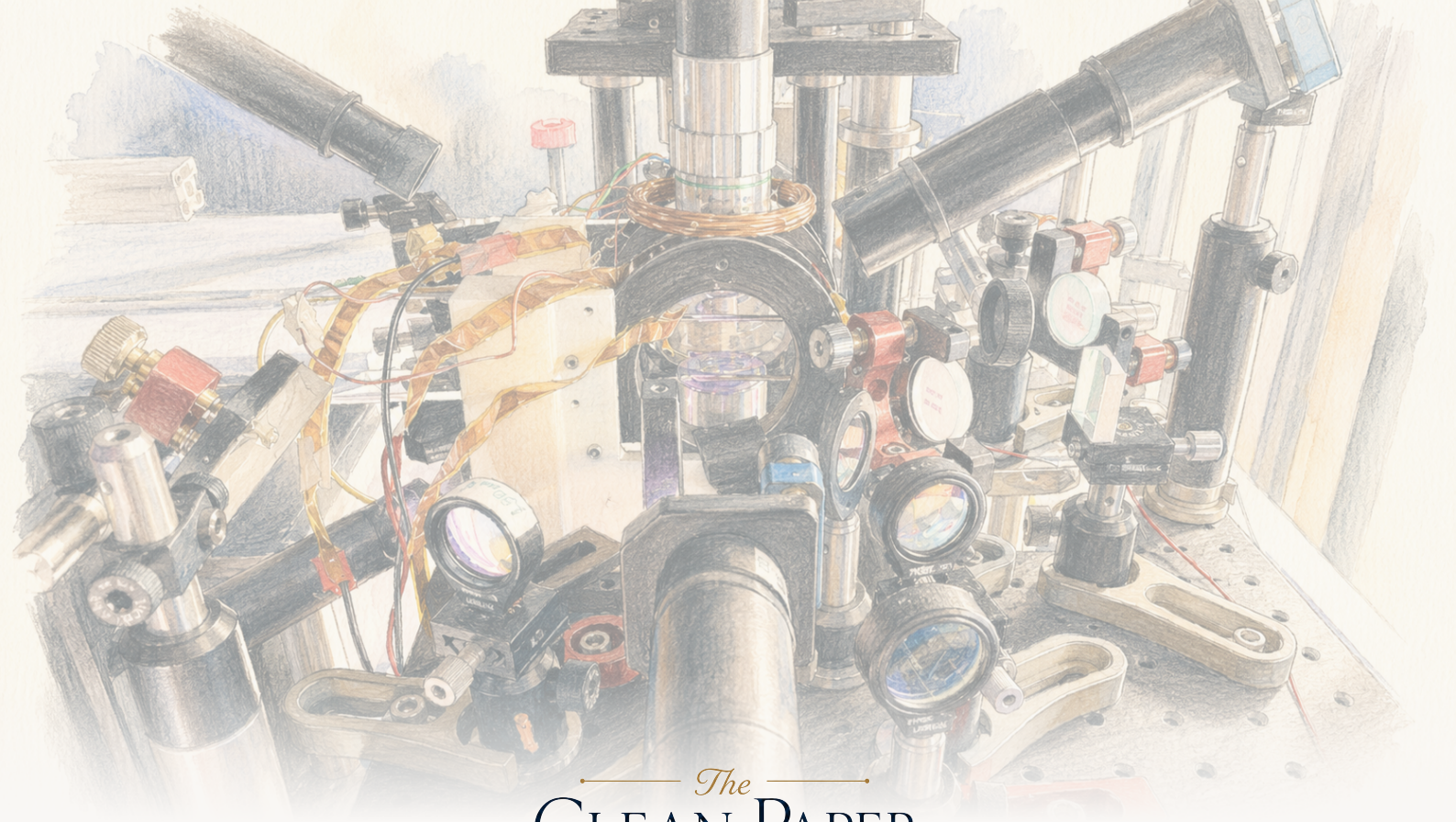

The Clean Paper

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

Soyuq-atom təcrübəsi kvant qravitasiyasının “zaman problemini” sınaqdan keçirir — laboratoriya analoqu kimi, cavab kimi yox

Kanonik kvant qravitasiyasında Wheeler-DeWitt tənliyində hadisələri ardıcıllığa salan xarici saat yoxdur: bu, “zaman problemi”dir. Tək müəllifli təcrübə Bose-Einstein kondensatını təcrid edir, nazik optik baryerlə müşahidə olunmayan və müşahidə olunan sektora bölür və onların arasında axan entropiyadan daxili saat qurur. Həmin “entropik zaman” müşahidə olunan sektorun genişlənmə və yenidən yığılmasını ardıcıllığa salır, effektiv tənlik isə araşdırılmış aşağı-baryer halında ölçülmüş məlumatları təkrar yaradır. Bu, relyasion-zaman ideyaları üçün idarə olunan sınaq platformasıdır: “Böyük Partlayış”, “Böyük Çöküş” və “mini-kainat” qapalı qaz üçün analoji etiketlərdir, real kosmologiya deyil; iş zaman problemini və ya kvant qravitasiyasını həll etdiyini iddia etmir.

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

Tələnin içində entropiyadan qurulmuş saat

Kanonik kvant qravitasiyasında qəribə və inadkar bir tapmaca var: əsas tənlikdə zaman yoxdur. Bütün kainat üçün Wheeler-DeWitt tənliyi, Şrödinger tənliyinin ən yaxın analoqu, sadəcə müəyyən operatorun vəziyyətə təsirinin sıfır verdiyini deyir. Vaxtı işarələyən xarici parametr, "əvvəl" və "sonra"nı sıralayan heç nə yoxdur — halbuki biz zamanın keçdiyini açıq şəkildə yaşayırıq. Bu, **zaman problemidir** və yarım əsrdən çoxdur həllə müqavimət göstərir.

Physical Review Research jurnalındakı tək müəllifli məqalə onu həll etmir. Etdiyi şey daha sakit, öz mənasında isə daha faydalıdır: təklif olunan cavab ailələrindən birinin **real məlumatlarla sınaqdan keçirilə biləcəyi** kiçik və yaxşı nəzarət olunan laboratoriya sistemi qurur. Birmingham Universitetindən Giovanni Barontini Bose-Einstein kondensatını — vahid kvant cismi kimi davranan ultra-soyuq atom buludunu — götürür və "daxili", relyasion zaman ideyasının mübahisə yox, ölçmə mövzusu ola biləcəyi analoqa çevirir. Hiylə xarici saniyəölçəndən deyil, sistemin öz içində payladığı entropiyadan saat qurmaqdır.

"Zaman probleminin idarə olunan analoqu" ilə "fiziklər zamanı həll etdilər" arasındakı məsafə bu hekayənin özüdür və çox uzundur.

Tədqiqatçı nə etdi?

Qurğu konservativ optik dipol tələsində saxlanılan və salınmağa məcbur edilən təxminən **24.000 rubidium-87 atomundan** ibarət kondensatdır — bütün atom buludu tələ boyunca irəli-geri yellənir. Təxminən 8 mikron enində, rəqəmsal mikrogüzgü qurğusu ilə 675 nm işıqdan "çəkilmiş" **nazik optik baryer** tələni iki yarıya bölür. Bir yarı müşahidə olunur ("**parlaq sektor**"), digəri olunmur ("**qaranlıq sektor**"). Təcrübənin təxminən 100 millisaniyəlik pəncərəsində ölçülə bilən hissəcik itkisi və dissipasiya yoxdur; buna görə sistem yaxşı yaxınlaşma ilə qapalıdır və Hamiltonianın özü zamandan asılı deyil.

[figure_pair pending]

Solda maqneto-optik tələ şüşə hüceyrənin içində soyuq rubidium atomları buludunu yaradır: kondensatı hazırlamağa gedən erkən soyutma mərhələsi. Sağda Giovanni Barontini optik qurğunun yanında dayanır. Bunlar təcrübənin arxasındakı laboratoriya sisteminin fotolarıdır, həqiqi miniatür kainatın şəkilləri deyil.

Adi laboratoriya saatı ilə — hər 2 ms-də bir udulma şəkli ilə — izlənəndə parlaq sektor diqqətçəkən bir şey edir. Atomlar baryerdən keçir və sektor heç nədən böyüyür (Barontini bu anı "**Böyük Partlayış**" adlandırır), maksimum ölçüyə çatır, sonra yığılır və yenidən qaranlıq tərəfə boşalır ("**Böyük Çöküş**"). Baryerin hündürlüyündən asılı olaraq bu, dövri şəkildə təkrarlana bilər.

Sonra əsas nöqtə gəlir. Laboratoriya saatı sistemə *xaricidir* — Wheeler-DeWitt quruluşunun məhz icazə vermədiyi şey. Buna görə Barontini soruşur: parlaq sektorun tarixini **yalnız sistemin daxilindəki kəmiyyətlərlə ardıcıllığa salmaq mümkündürmü?** Onun cavabı

eyni şəkillərdən üç sadə addımda oxunan, **entropik zaman** adlandırdığı saatdır. Birincisi, hər udulma şəklindən parlaq sektor üçün dörd rəqəm çıxarır: atom sayı, sıxlıq profilinin kütlə mərkəzi (analoq "skalyar sahə" rolunu oynayır), eni və entropiyası — standart üsulla alınmış atom başına entropiyanın atom sayına vurulması. İkincisi, atomlar baryerdən keçdikcə bu entropiya artıb-azalır. Üçüncüsü, saat ölçülmüş kütlə-mərkəzi yolu boyunca entropiya qradiyentini izləyir, hər yerdəyişmənin istiqamətini yox, modulunu sayır. Entropiya və kütlə mərkəzi birlikdə artanda və ya azalanda bulud istiqaməti dəyişsə də hər addım saatı irəli aparır. Məlumatlarda bu, sektorun "Böyük Partlayış"ından "Böyük Çöküş"ına qədər demək olar hər yerdə vahid ardıcıllıq verir; yalnız kobud nümunələmənin iki dəyişikliyi uyğunlaşdırmadığı bir neçə kiçik dalğalanma var.

Nəhayət o, xarici saat əvəzinə bu daxili saatla yazılmış parlaq sektor üçün təkamül tənliyi olan effektiv **"entropik-zaman Şrödinger tənliyini"** çıxarır və kameranın əslində qeydə aldığı şeyi təkrar yarada bilib-bilmədiyini görmək üçün ədədi həll edir.

Nə tapıldı?

Ambisiya səviyyəsi artan üç nəticə.

- **Daxili saat ardıcıllıq kimi işləyir.** Entropik zaman demək olar hər yerdə monoton artır və sürəti entropiyanın baryerdən nə qədər sürətlə keçməsi ilə müəyyən olunur: entropiya mübadiləsi sürətli olanda daha sürətli gedir və **mübadilə olmayanda tam dayanır**. Geri çevrilə bilən, aşağı-baryer rejimində Böyük Çöküş ilə növbəti Böyük Partlayış arasında *heç bir daxili zaman keçmir* — çünki orada entropiya mübadiləsi yoxdur — laboratoriya saatı isə işləməyə davam edir. Bütün məlumat dəstində iki sektorun birlikdə ümumi entropiyası qapalı sistem üçün lazım olduğu kimi xəta sərhədləri daxilində sabit qalıb.
- **Fərqli rejimlər fərqli "zamanlar" verir.** Baryeri yüksəltdikdə entropiya mübadiləsi azalır, daxili saat yavaşlayır. İki sektorun demək olar əlaqə saxlamadığı həddə çatanda parlaq sektor məqalənin "**istilik ölümü**" adlandırdığı vəziyyətə yaxınlaşır: entropik zamanın sadəcə dayandığı stasionar hal.
- **Effektiv tənlik məlumatları təkrar yaradır.** Təcrübə parametrləri verilən entropik-zaman Şrödinger tənliyi bulud eninin ölçülmüş təkamülünü ədədi şəkildə təkrar yaradır; məqalə aşağı-baryer halında (entropiya ilə idarə olunan termin üstün olanda) əla uyğunluq bildirir və açıq ədədi müqayisə məhz həmin hal üçün aparılıb.

> **"Zaman problemi" nədir və burada "entropik zaman" nədir?**
>
> **Zaman problemi** kanonik kvant qravitasiyasının əsas tənliyində (Wheeler-DeWitt) xarici zaman dəyişəninin olmamasıdır. Yayılmış cavablardan biri *relyasion* yanaşmadır: sistemin daxilində bir fiziki kəmiyyəti "saat" kimi seçib qalan hər şeyi ona nisbətən təsvir etmək. Təkrarlanan çətinlik odur ki, təbii saat seçimləri həmişə monoton olmur — yenidən yığılan sistem namizəd saatı əvvəl irəli, sonra geri aparır — buna görə

> başlanğıcdan sona vahid istiqaməti təmiz etiketləyə bilmir.
> **Entropik zaman** Barontininin bunu aşma üsuludur. Mövqe tipli dəyişəni oxumaq əvəzinə, müşahidə olunan və olunmayan sektorlar arasında mübadilə edilən *entropiyadan* saat qurur və onu geriyə dönməyəcək şəkildə formalaşdırır. Ruhən köhnə "termal zaman" ideyalarına yaxındır, amma burada abstrakt riyazi quruluşdan yox, ölçülə bilən entropiya axınından əməli şəkildə müəyyən olunur — məhz buna görə real qurğuda sınaqdan keçirilə bilir.
> Əsas məsələ: kosmoloji sözlər — "Böyük Partlayış", "Böyük Çöküş", "miqyas amili", "skalyar sahə", "mini-kainat" — **analoji etiketlərdir**. Sadələşdirilmiş kosmoloji modellərin tənliklərinə *struktur baxımından bənzər* xüsusiyyətləri olan tələdəki atom qazını adlandırırlar. Real kainat haqqında bəyanat deyil.

Bu nəyi sübut etmir?

Burada ən çox ehtiyat məhz lazımdır, çünki terminologiya şişirtməyə dəvət edir.

- **Zaman problemini həll etmir və etdiyini iddia etmir.** Məqalənin öz çərçivəsi "relyasion-zaman konstruksiyalarının kəmiyyətcə sınaqdan keçirilə biləcəyi idarə olunan eksperimental mühit" yaratmaqdır. Sınaq platforması teorem deyil. Relyasion və ya entropik zamanın kvant qravitasiyasında zamanın *doğru* izahı olub-olmaması əvvəlki kimi açıq qalır.
- **Bu, analoqdur, kainat deyil.** Heç bir kosmologiya müşahidə olunmur. Tələdə Bose-Einstein kondensatı müşahidə olunur və onun azaldılmış təsviri sadələşdirilmiş ("mini-superspace") kosmoloji modelə *riyazi olaraq bənzəyir*. Oxşarlıq təcrübənin məqsədidir; sərhədi də elə budur. Burada heç nə erkən kainatın bu növ Böyük Partlayış keçirdiyini, fəza-zamanın atomlardan qurulduğunu və ya "zamanın mövcud olmadığını" göstərmir.
- **Zamanın "əslində" entropiya olduğunu göstərmir.** Entropik saat bu sistemdə yaxşı işləyən qurulmuş ardıcıllıqdır. Məqalə termal-zaman hipotezi ilə konseptual qohumluğu qeyd edir, amma ikisinin hətta üst-üstə düşüb-düşmədiyini açıq saxlayır. "Entropiyadan qurulmuş daxili saat bu təcrübəni ardıcıllığa sala bilir" iddiası "zaman entropiyadır" iddiasından xeyli dardır.
- **Effektiv tənlik kvant mexanikasının yenidən yazılması yox, modelləşdirmə nəticəsidir.** Çıxarılan entropik-zaman Şrödinger tənliyi entropiya axını yavaş olanda adi kvant mexanikasına yaxınlaşır və yalnız entropiya heç axmayanda tam adi unitar nəzəriyyə olur. Məqalə onu standart tənlikdən daha ümumi kimi *xüsusilə müşahidə olunan sistem termodinamik baxımdan müşahidə olunmayan sistemə açıq olduqda* təqdim edir — bu tip qurğuda açıq alt sistemlər haqqında iddiadır, fundamental fizikanın mütləq bu cür yenidən yazılmalı olduğu barədə yox.
- **Bu, bir təcrübə, bir müəllif və bir saat seçimidir.** Nəticələr hər nöqtə üçün təxminən 5% statistik qeyri-müəyyənliyə malikdir və orta-sahə və ortalanmış-sıxlıq yaxınlaşmalarına söykənir. Seçilmiş saat və kobudlaşdırılmış təsvir şüurlu modelləşdirmə qərarlarıdır; struk-

tur nəticələr çıxarmazdan əvvəl başqa qrupların sınaqdan keçirmək istəyəcəyi növdən.

Sübut nə qədər güclüdür?

Əslində iddia etdiyi təvazökar məsələ üçün sübut təmizdir. Sistem müvafiq zaman miqyasında həqiqətən yaxşı təcrid olunub, entropiya hesabı bağlanır (ümumi entropiya xəta daxilində sabitdir), daxili saat məlumatları demək olar hər yerdə monoton ardıcıllığa salır və müəllifin eyni modeldən, məlumatlardan çıxarılan parametrlərlə əldə etdiyi effektiv tənlik tətbiq edildiyi aşağı-baryer halda ölçülmüş dinamikanı təkrar yaradır. Məlumatlar açıqdır. Bu, düşüncə təcrübəsi yox, real və idarə olunan sistemin real ölçməsidir.

Onun daşıya biləcəyi ağırlıq da uyğun şəkildə məhduddur. Hər şey azaldılmış kondensat modeli ilə minisuperspace kosmologiyası arasındakı analogiyaya söykənir; analogiyalar izah edir, sübut etmir. Tək platformada, tək müəllifin bir daxili-zaman reseptinin işlədiyini göstərməsi güclü prinsip sübutudur, təbiətdə zamanın necə davrandığı barədə geniş iddia üçün zəif əsasdır. Düzgün oxunuş: metod artıq laboratoriyada *edilə* və yoxlana bilən bir şeydir.

Niyə önəmlidir?

Zaman problemi barədə mübahisələr uzun müddət formalizm səviyyəsində ilişib qalıb; rəqib təklifləri falsifikasiya etmək çətindir, çünki az konkret, ölçülə bilən proqnoz verirlər. Bu mübahisənin bir küncünü belə işlədə biləcəyiniz təcrübəyə çevirmək — daxili saat ya məlumatları ardıcıllığa salır, ya yox; effektiv tənlik ya uyğunlaşır, ya yox — müzakirənin xarakterini dəyişir. Nəzəriyyəçilərə alətlərini sınaqdan keçirə biləcəkləri laboratoriya skamyası verir.

Həqiqi töhfə budur: zaman barədə cavab yox, **sualı kəmiyyətcə vermək üçün yer**. Soyuq atom platformaları Hawking şüalanması, genişlənən kainatlar və saxta-vakuum çöküşü üçün idarə olunan analoqlar kimi artıq istifadə olunub; bu iş həmin alətlər qutusuna relyasion zaman və zaman oxunu əlavə edir. Dəyər yaratdığı davam işlərindədir — fərqli saat seçimləri, sıçrayan və singular davranış, geri çevriləbilərlik sınaqları — bunların hər biri artıq yalnız hesab yox, ölçmə ola bilər.

Təmiz xülasə

Fizik Bose-Einstein kondensatı yaradıb, nazik optik baryerlə onu müşahidə olunan və olunmayan yarıya bölüb və yarılar arasında axan entropiyadan daxili “entropik zaman” qurub. Bu saat müşahidə olunan yarının genişlənmə və yenidən yığılma dövrünü ardıcıllığa salır; entropiya mübadiləsi olanda sürətli işləyir, olmayanda dayanır. Bu daxili zamanla yazılmış

effektiv tənlik müəllifin araşdırdığı aşağı-baryer halda ölçülmüş məlumatları təkrar yaradır. Qurğu kanonik kvant qravitasiyasındakı “zaman problemi”nin analoqudur: “Böyük Partlayış”, “Böyük Çöküş” və “mini-kainat” sadələşdirilmiş kosmoloji modelə riyazi bənzəyən tələdəki qaz üçün etiketlərdir. Bu, relyasion-zaman ideyaları üçün idarə olunan sınaq platformasıdır — zaman probleminin həlli deyil, real kainat haqqında iddia deyil və zamanın “əslində” entropiya olduğuna sübut deyil.

No-BS yoxlaması

Məqalə nə göstərir: Yaxşı təcrid olunmuş bir soyuq-atom sistemində entropiya mübadiləsindən müəyyən edilən daxili saat müşahidə olunan dinamikanı monoton ardıcıllığa sala bilər və effektiv “entropik-zaman” tənliyi araşdırılmış aşağı-baryer halda ölçülmüş təkamülü təkrar yaradır.

Ağlabatan, amma göstərilməmiş hissə: Entropik və ya relyasion zamanın real kvant qravitasiyasında zaman üçün yaxşı izah olması. Təcrübə belə konstruksiyaları ciddi qəbul etməklə uyğundur; onları təbiət üçün təsdiqləmir.

Nəyi göstərmir: Zaman probleminin həll olunduğunu; kvant qravitasiyasının həll edildiyini; kainatın bu növ Böyük Partlayış ilə başladığını; fəza-zamanın atomlardan ortaya çıxdığını; və ya “zamanın mövcud olmadığını”.

Əsas məhdudiyyətlər: Tək platforma, tək müəllif və tək saat seçimi; hər nöqtə üçün təxminən 5% qeyri-müəyyənlik; orta-sahə və ortalanmış-sıxlıq yaxınlaşmaları; və hər şeydən əvvəl tələdəki kondensatla sadələşdirilmiş kosmoloji model arasındakı analogiyaya söykənməsi.

Ümumi oxucu nə qədər əmin olmalıdır? Təcrübənin öz sistemində bildirdiyini etdiyinə yüksək inam. Bu analogiyadan real kainatda zaman haqqında iddialara sıçrayışa isə aşağı inam.

Mənbələr

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