The
CLEAN PAPER

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

Bir soğuk-atom deneyi kuantum kütleçekiminin 'zaman problemini' sınava sokuyor — yanıt olarak değil, laboratuvar analogu olarak

Kanonik kuantum kütleçekiminde Wheeler-DeWitt denkleminde olayları sıralayan dış bir saat yoktur: 'zaman problemi'. Tek yazarlı bir deney, bir Bose-Einstein yoğuşmasını izole ediyor, ince bir optik bariyerle gözlenmeyen ve gözlenen sektörlere ayırıyor ve aralarında akan entropiden bir iç saat kuruyor. Bu 'entropik zaman' gözlenen sektörün genişleme ve yeniden çökmesini sıralıyor; etkin bir denklem de incelenen düşük-bariyer vakasında ölçülen verileri yeniden üretiyor. Bu, ilişkisel-zaman fikirleri için kontrollü bir test yatağıdır: 'büyük patlama', 'büyük çöküş' ve 'mini-evren' hapsedilmiş bir gaz için analog etiketlerdir, gerçek kozmoloji değil; çalışma zaman problemini veya kuantum kütleçekimini çözdüğünü iddia etmiyor.

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

Bir tuzağın içinde entropiden yapılmış bir saat

Kanonik kuantum kütleçekiminde tuhaf ve inatçı bir bilmece vardır: temel denklemde zaman yoktur. Wheeler-DeWitt denklemi, bütün evren için bir Schrödinger denklemine en çok benzeyen denklem olarak, yalnızca belirli bir operatörün duruma etki ettiğinde sıfır verdiğini söyler. Tıklayan bir dış parametre, "önce" ile "sonra"yı sıralayan hiçbir şey yoktur — oysa zamanın geçtiğini açıkça deneyimleriz. Bu **zaman problemi**dir ve yarım yüzyıldan uzun süredir çözüme direniyor.

Physical Review Research dergisindeki tek yazarlı bir makale bunu çözmüyor. Yaptığı şey daha sessiz ve kendi biçiminde daha kullanışlı: önerilmiş yanıt ailelerinden birinin **gerçek veriye karşı sınanabileceği**, küçük ve iyi kontrol edilen bir laboratuvar sistemi kuruyor. Birmingham Üniversitesi'nden Giovanni Barontini, tek bir kuantum nesnesi gibi davranan aşırı soğuk atom bulutu olan bir Bose-Einstein yoğuşmasını alıp "içsel", ilişkisel zaman fikrinin tartışılmak yerine ölçülebileceği bir analoga dönüştürüyor. Hile, saati dışarıdaki bir kronometreden değil, sistemin kendi içinde dolaştırdığı entropiden kurmak.

"Zaman probleminin kontrollü bir analogu" ile "fizikçiler zamanı çözdü" arasındaki mesafe bu hikâyenin tamamıdır — ve bu mesafe uzundur.

Araştırmacı ne yaptı?

Düzenek, korunumlu bir optik dipol tuzağında tutulan ve salınıma bırakılan yaklaşık **24.000 rubidyum-87 atomundan** oluşan bir yoğuşmadır — tüm atom bulutu tuzağın içinde ileri geri sallanır. Yaklaşık 8 mikron genişliğinde, dijital mikroayna aygıtıyla 675 nm ışık kullanılarak oluşturulan **ince bir optik bariyer**, tuzağı iki yarıya böler. Bir yarı gözlenir ("**aydınlık sektör**"), diğeri gözlenmez ("**karanlık sektör**"). Deneyin yaklaşık 100 milisaniyelik penceresinde ölçülebilir parçacık kaybı veya disipasyon görülmez; dolayısıyla sistem iyi bir yaklaşımla kapalıdır ve Hamiltonyeni de zamanın kendisine bağlı değildir.

[figure_pair pending]

Solda, manyeto-optik tuzak cam hücre içinde soğuk rubidyum atom bulutunu üretir: yoğuşmayı hazırlama yolundaki erken soğutma aşaması. Sağda Giovanni Barontini optik düzeneğin yanında duruyor. Bunlar deneyin arkasındaki laboratuvar sisteminin fotoğraflarıdır; gerçek bir minyatür evrenin görüntüleri değildir.

Sıradan bir laboratuvar saatiyle — her 2 ms'de bir soğurma görüntüsü alınarak — izlendiğinde aydınlık sektör çağrışımlı bir şey yapar. Atomlar bariyeri geçer ve sektör hiçlikten büyür (Barontini bu ana "**büyük patlama**" der), maksimum boyutuna ulaşır, sonra daralır ve yeniden karanlık tarafa boşalır ("**büyük çöküş**"). Bariyerin yüksekliğine bağlı olarak bu döngüsel biçimde tekrarlanabilir.

Sonra asıl nokta gelir. Laboratuvar saati sistemin *dışındadır* — Wheeler-DeWitt çerçevesinin tam da izin vermediği türden bir şey. Barontini bu nedenle şunu sorar: aydınlık sektörün geçmişi **yalnızca sistemin içindeki nicelikler kullanılarak sıralanabilir mi?** Yanıtı, aynı görüntülerden üç basit adımda doğrudan okunan ve **entropik zaman** adını verdiği bir saattir. İlk olarak her soğurma

görüntüsünden aydınlık sektör için dört sayı çıkarır: atom sayısı, yoğunluk profilinin kütle merkezi (analog bir "skaler alan" rolü oynar), genişliği ve entropisi — standart bir yöntemle elde edilen atom başına entropinin atom sayısıyla çarpımı. İkinci olarak atomlar bariyeri geçtikçe bu entropi yükselir ve düşer. Üçüncü olarak saat, ölçülen kütle-merkezi yolu boyunca entropi gradyanını izler; her yer değiştirmenin yönünü değil büyüklüğünü sayar. Entropi ile kütle merkezi birlikte yükseldiğinde veya birlikte düştüğünde, bulut yön değiştirse bile her adım saati ilerletir. Verilerde bu, birkaç kaba örnekleme noktasında iki değişimin uyuşmamasından kaynaklanan küçük dalgalanmalar dışında, sektörün "büyük patlama"sından "büyük çöküş"üne kadar tek yönlü bir sıralama verir.

Son olarak Barontini, aydınlık sektörün evrimini dış saat yerine bu iç saate göre yazan etkin bir **"entropik-zaman Schrödinger denklemi"** türetir ve kameranın gerçekten kaydettiğini yeniden üretip üretmediğini görmek için sayısal olarak çözer.

Ne buldu?

Artan iddia düzeyine göre üç sonuç var.

- **İç saat bir sıralama olarak çalışıyor.** Entropik zaman neredeyse her yerde monoton artıyor ve hızı entropinin bariyerden ne kadar hızlı geçtiğiyle belirleniyor: entropi alışverişi olduğunda daha hızlı işliyor, **hiç alışveriş olmadığında tamamen duruyor**. Tersinir, düşük bariyerli rejimde bir büyük çöküş ile sonraki büyük patlama arasında laboratuvar saati işlemeye devam etse bile *hiç iç zaman geçmiyor* — çünkü o aralıkta entropi değiş tokuşu yok. Tüm veri kümesinde iki sektörün toplam entropisi, kapalı bir sistemin gerektirdiği gibi hata payları içinde sabit kaldı.
- **Farklı rejimler farklı "zamanlar" veriyor.** Bariyeri yükseltince entropi alışverişi azalıyor ve iç saat daha yavaş işliyor. İki sektörün neredeyse hiç konuşmadığı noktaya kadar götürüldüğünde aydınlık sektör, makalenin "**ısı ölümü**" dediği şeye yaklaşır: entropik zamanın düpedüz durduğu durağan bir durum.
- **Etkin bir denklem verileri yeniden üretiyor.** Deney parametreleriyle beslenen entropik-zaman Schrödinger denklemi, bulut genişliğinin ölçülen evrimini sayısal olarak yeniden elde ediyor; makale düşük bariyerli durumda (entropi kaynaklı terimin baskın olduğu durum) mükemmel uyum bildiriyor. Açık sayısal karşılaştırma da bu vaka için yapılmış.

> **"Zaman problemi" ve buradaki "entropik zaman" nedir?**
>
> **Zaman problemi**, kanonik kuantum kütleçekiminin ana denkleminin (Wheeler-DeWitt) dış bir zaman değişkeni içermemesidir. Yaygın bir yanıt *ilişkisel* yaklaşımdır: sistemin içindeki fiziksel niceliklerden birini "saat" olarak seçip geri kalan her şeyi ona göre tarif etmek. Tekrarlayan bir sorun, doğal saat adaylarının her zaman monoton olmamasıdır — yeniden çöken bir sistem adayı önce ileri, sonra geri götürebilir — bu nedenle başlangıçtan sona tek yönü temiz biçimde etiketleyemez.
> **Entropik zaman**, Barontini'nin bunu aşma yoludur. Konum benzeri bir değişkeni okumak yerine saati, gözlenen ve gözlenmeyen sektörler arasında değiş tokuş edilen *entropiden* kurar

> ve tersine dönmeyecek şekilde tanımlar. Fikir olarak daha eski "termal zaman" yaklaşımlarına yakındır; ancak burada soyut matematiksel yapıdan değil, ölçülebilir entropi akışından operasyonel olarak tanımlanır — gerçek bir düzende sınanabilir olmasını sağlayan şey de budur.
> En önemlisi, kozmolojik sözcükler — "büyük patlama", "büyük çöküş", "ölçek faktörü", "skaler alan", "mini-evren" — **analog etiketlerdir**. Basitleştirilmiş kozmolojik modellerin denklemlerine *yapısal olarak benzeyen* hapsedilmiş atom gazının özelliklerini adlandırırlar. Gerçek evren hakkında ifadeler değildir.

Bu çalışma neyi kanıtlamıyor?

Sözcük dağarcığı aşırı yoruma çok açık olduğu için en fazla dikkat burada gerekiyor.

- **Zaman problemini çözmüyor ve çözdüğünü iddia etmiyor.** Makalenin kendi çerçevesi, "ilişkisel-zaman yapılarının nicel olarak sınanabileceği kontrollü bir deneysel ortam" kurduğu yönünde. Test yatağı teorem değildir. İlişkisel ya da entropik zamanın kuantum kütleçekiminde zamanın *doğru* açıklaması olup olmadığı daha önce olduğu kadar açık kalıyor.
- **Bu bir analog, evrenin kendisi değil.** Kozmoloji gözlenmiyor. Bir tuzaktaki Bose-Einstein yoğuşması gözleniyor ve onun indirgenmiş tanımı basitleştirilmiş ("minisüperspace") kozmolojik modele *matematiksel olarak benziyor*. Bu benzerlik deneyin amacı; aynı zamanda sınırı. Buradaki hiçbir şey erken evrenin bu tür bir büyük patlama yaşadığını, uzay-zamanın atomlardan oluştuğunu veya "zamanın var olmadığını" göstermiyor.
- **Zamanın 'gerçekte' entropi olduğunu göstermiyor.** Entropik saat, bu sistemde iyi çalışan inşa edilmiş bir sıralamadır. Makale termal-zaman hipoteziyle kavramsal akrabalığını not ediyor ama ikisinin çakışıp çakışmadığını bile açık bırakıyor. "Entropiden yapılmış bir iç saat bu deneyi sıralayabilir" iddiası, "zaman entropidir" iddiasından çok daha dardır.
- **Etkin denklem bir modelleme sonucudur; kuantum mekaniğinin yeniden yazımı değil.** Türetilen entropik-zaman Schrödinger denklemi, entropi akışı yavaş olduğunda olağan kuantum mekaniğine yaklaşır ve yalnızca hiç entropi akmadığında standart üniter teoriyle tam olarak aynıdır. Makale onu, özellikle gözlenen bir sistem termodinamik olarak gözlenmeyen bir sisteme açık olduğunda standart denklemden daha genel olarak konumlandırıyor — bu tür düzenlerde açık alt sistemlere ilişkin bir ifade; temel fiziğin böyle yeniden yazılması gerektiği iddiası değil.
- **Tek deney, tek yazar, tek saat seçimi.** Sonuçlarda nokta başına yaklaşık %5 istatistiksel belirsizlik var ve ortalama-alan ile ortalanmış-yoğunluk yaklaşımlarına dayanıyor. Seçilen saat ve kaba tanelendirme bilinçli modelleme kararları; yapısal sonuçlar çıkarmadan önce başka grupların da incelemek isteyeceği türden.

Kanıt ne kadar güçlü?

Gerçekte iddia ettiği mütevazı şey açısından kanıt açık. Sistem ilgili zaman ölçeğinde gerçekten iyi izole edilmiş, entropi hesabı kapanıyor (toplam entropi hata içinde sabit), iç saat verileri neredeyse her yerde monoton olarak sıralıyor ve yazarın aynı modelden, verilerden çıkarılan parametrelerle türettiği etkin denklem, uygulandığı düşük-bariyer vakasında ölçülen dinamiği yeniden üretiyor. Veriler açık erişimli. Bu, düşünce deneyi değil; gerçek, kontrol edilebilir bir sistemin gerçek ölçümü.

Taşıyabileceği yük de buna paralel olarak mütevazı. Her şey indirgenmiş yoğuşma modeli ile minisüperspace kozmolojisi arasındaki analojiye dayanıyor; analojiler aydınlatır ama kanıtlamaz. Tek bir platformda, tek bir yazar tarafından bir iç-zaman tarifinin çalıştığının gösterilmesi güçlü bir ilke kanıtı; zamanın doğada nasıl davrandığına dair iddialar için zayıf bir temel. Doğru okuma şu: yöntem artık laboratuvarda *yapabileceğiniz* ve kontrol edebileceğiniz bir şey.

Neden önemli?

Zaman problemi tartışmaları uzun süredir biçimsel düzeyde sıkışmış durumda; rakip önerileri yanlışlamak zor, çünkü az sayıda somut ve ölçülebilir öngörü yapıyorlar. Bu tartışmanın küçük de olsa bir köşesini çalıştırılabilir bir deneye dönüştürmek — iç saat verilerinizi ya sıralar ya sıralamaz, etkin denklem ya uyar ya uymaz — tartışmanın karakterini değiştiriyor. Kuramcılara araçlarını test edebilecekleri bir tezgâh veriyor.

Gerçek katkı budur: zaman hakkında bir yanıt değil, **soruyu nicel olarak sorabileceğiniz bir yer**. Soğuk-atom platformları daha önce Hawking ışınımı, genişleyen evrenler ve yalancı-vakum bozunması için kontrol edilebilir analoglar olarak kullanıldı; bu çalışma araç kutusuna ilişkisel zamanı ve zaman okunu ekliyor. Değeri mümkün kıldığı takip çalışmalarında — farklı saat seçimleri, sıçrayan ve tekillikli davranış, tersinirlik testleri — her biri artık yalnızca hesap değil, ölçüm olabilir.

Kısa özet

Bir fizikçi Bose-Einstein yoğuşması kurdu, ince bir optik bariyerle gözlenen ve gözlenmeyen iki yarıya böldü ve yarılar arasında akan entropiyi kullanarak içsel bir "entropik zaman" oluşturdu. Bu saat gözlenen yarının genişleme ve yeniden-çökme döngüsünü sıralıyor; entropi alışverişi olduğunda hızlı işliyor, olmadığında duruyor ve bu iç zamana göre yazılan etkin bir denklem, yazarın incelediği düşük-bariyer vakasında ölçülen verileri yeniden üretiyor. Düzenek, kanonik kuantum kütleçekimindeki "zaman problemi"nin bir analogudur: "büyük patlama", "büyük çöküş" ve "mini-evren", basitleştirilmiş kozmolojik modele matematiksel olarak benzeyen hapsedilmiş bir gaz için kullanılan etiketlerdir. İlişkisel-zaman fikirleri için kontrollü bir test yatağıdır — zaman probleminin çözümü değil, gerçek evren hakkında bir iddia değil ve zamanın "gerçekte" entropi olduğunun kanıtı değil.

Abartısız değerlendirme

Makalenin gösterdiği: İyi izole edilmiş tek bir soğuk-atom sisteminde, entropi alışverişinden tanımlanan bir iç saat gözlenen dinamiği monoton biçimde sıralayabiliyor ve etkin bir "entropik-zaman" denklemi incelenen düşük-bariyer vakasında ölçülen evrimi yeniden üretiyor.

Makul ama gösterilmemiş olan: Entropik ya da ilişkisel zamanın gerçek kuantum kütleçekiminde zamanı iyi açıkladığı. Deney bu yapıları ciddiye almakla uyumlu; doğa için doğrulamıyor.

Göstermediği: Zaman probleminin çözüldüğünü; kuantum kütleçekimin çözüldüğünü; evrenin bu tür bir büyük patlamayla başladığını; uzay-zamanın atomlardan ortaya çıktığını; ya da "zamanın var olmadığını".

Başlıca sınırlamalar: Tek platform, tek yazar ve tek saat seçimi; nokta başına yaklaşık %5 belirsizlik; ortalama-alan ve ortalanmış-yoğunluk yaklaşımları; ve hepsinden önemlisi hapsedilmiş bir yoğuşma ile basitleştirilmiş kozmolojik model arasındaki analojiye dayanması.

Genel okuyucu ne kadar güvenmeli? Deneyin kendi sistemi üzerinde bildirdiği şeyi yaptığına yüksek güven. Bu analogdan gerçek evrende zaman hakkında iddialara sıçramaya düşük güven.

Kaynaklar

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