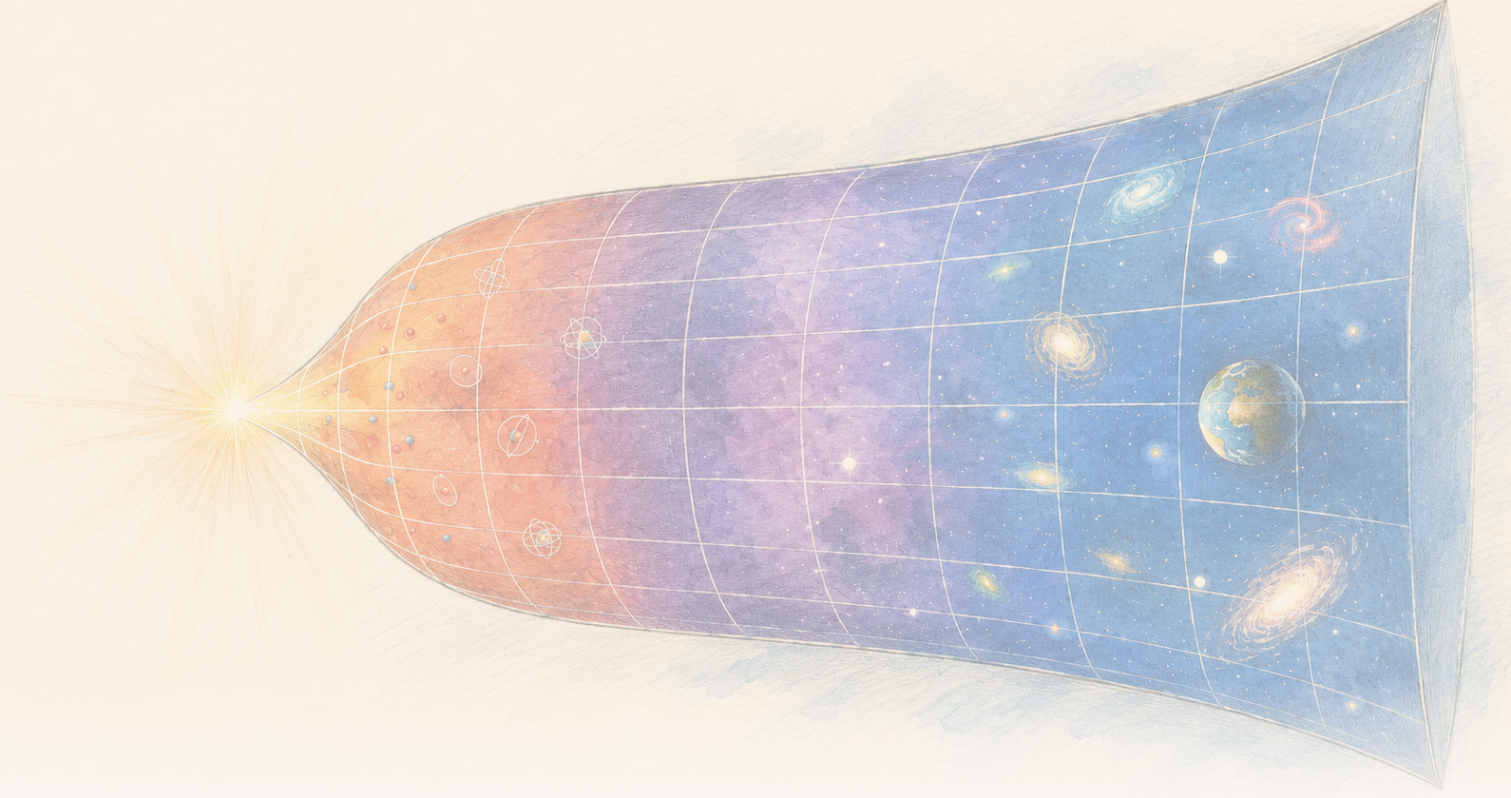




The CLEAN PAPER

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

Entropi temelli bir yerçekimi modelinde yerel entropi yoğunluğu azalırken toplam artıyor

Bir Physical Review D makalesi, önerilmiş değiştirilmiş yerçekimi çerçevesi Gravity From Entropy içinde sıcaklıklar, basınçlar ve birinci yasa türetiyor. Geç zaman, düşük eğrilikli Friedmann yaklaşımında modelin yerel entropi ve enerji yoğunlukları düşerken genişleme toplam entropinin artmasını sağlıyor. Hesaplama kendi içinde somut ama koşullu: Friedmann kozmolojileri tam kuramın kesin çözümleri değil ve bu, yerçekiminin entropiden geldiğine dair gözlemsel kanıt, ölçülen karanlık enerjinin açıklaması veya tamamlanmış bir kuantum yerçekimi kuramı değil.

Written by Laura Nesso · Cross-checked by Cinzia Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela
· AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Thermodynamics of the gravity from entropy theory*, Ginestra Bianconi, Physical Review D 114, 024042 (2026) · DOI: 10.1103/26kn-thgp

Büyüyen bir hacim, yoğunluğu düşürürken toplamı artırabilir

Bu modelde evren genişledikçe entropi yoğunluğu düşüyorsa toplam entropi nasıl yine de artabilir?

Genişleyen bir evreni küçük hücrelere bölünmüş olarak düşünün. Her hücredeki bir şeyin miktarı azalırken büyüyen bölgenin tamamındaki toplam miktar artabilir. Hacmin kendisi değişiyorsa yoğunluğun azalması ile toplamın artması birbirinin zıttı değildir.

Bu basit muhasebe problemi, çok daha iddialı bir kuramsal makalenin merkezinde yer alıyor. Matematiksel fizikçi Ginestra Bianconi, Physical Review D’de, kütle ile geometrinin bilgi-kuramsal bir ilişkisi üzerinden yerçekiminin kodlandığı yakın zamanda önerilmiş **Entropiden Yerçekimi** (Gravity From Entropy, GfE) modelinin termodinamik bir betimlemesini geliştiriyor. Burada “bilgi-kuramsal”, modelin geometrinin iki betimlemesinin — fiziksel geometri ile madde ve eğrilik tarafından indüklenen geometrinin — ne kadar farklı olduğunu ölçen matematiksel bir nicelikten başladığı anlamına gelir.

Makale k-entropileri, k-enerjileri, k-sıcaklıkları ve k-basınçları adı verilen yerel nicelikleri türetiyor. k öneki modeldeki farklı geometrik sektörleri ayırır; bunlar farklı maddeler veya kozmik çağlar değildir. Birinci yasa ilişkileri termodinamikle aynı muhasebe biçimine sahiptir: enerjideki değişim, sıcaklık çarpı entropi değişimi eksi basınç çarpı hacim değişimiyle ilişkilidir.

$$\delta\epsilon_k = \theta_k \delta s_k - \pi_k \delta v$$

Makale daha sonra bu nicelikleri, büyük ölçeklerde homojen ve izotropik standart idealize evrenler olan genişleyen Friedmann kozmolojilerinde değerlendiriyor. Düşük enerji ve küçük eğrilik rejiminde, madde ve radyasyon egemen örneklerde yerel entropi ve enerji yoğunlukları azalırken genişleme toplam entropinin artmasına yetecek kadar hacim sağlıyor. Toplam enerji ise öncü mertebede bir sabite yaklaşıyor; yani büyük zamanda baskın terim korunup zaman büyüdükçe daha hızlı sönen terimler atıldığında.

Bu açık bir matematiksel sonuçtur. Sınırı da aynı derecede önemlidir: hesaplama **önerilmiş tek bir kuramın içinde** yapılır ve somut örneklerde kullanılan Friedmann kozmolojileri, tam GfE denklemlerinin kesin değil yalnızca **yaklaşık** çözümleridir. Bu hareket denklemleri önerilen GfE eyleminin varyasyonundan gelir ve sıradan Friedmann denklemlerinde bulunmayan dinamik G-alanını ve daha yüksek mertebeli geometrik sektörleri içerir. Makale entropinin yerçekimi ürettiğini gözlemlemiyor, Evrenimizdeki karanlık enerjiyi tanımlamıyor ve bir kuantum yerçekimi kuramını tamamlamıyor.

Entropiden Yerçekimi neyi varsayıyor

Genel görelilik yerçekimini uzayzaman geometrisi üzerinden tanımlar. Madde uzayzamana nasıl eğrileceğini, eğrilik de maddeye nasıl hareket edeceğini söyler. GfE farklı bir önerilen eylemden başlar: metrikle ilişkili nesneleri kuantum operatörleri olarak ele alır ve Lagrangian’ını **Geometrik**

Kuantum Görelî Entropi (GQRE) üzerinden kurar.

Üç terim 120 saniyede

Bir **kuantum operatörü**, bir kuantum durumu üzerinde etkide bulunan ve bir niceliği veya dönüşümü temsil eden matematiksel bir kuraldır. GfE metrikle ilişkili nesnelerinin bu şekilde ele alınabileceğini varsayar; makale okuyucudan bu yapıyı yeniden üretmesini istemez.

Bir **Lagrangian**, bir kuramın dinamiğini kompakt biçimde tanımlayan matematiksel reçetedir. Uzayzaman üzerinde integrali alınarak eylem elde edilir; ardından bu eylem varye edilerek alan denklemleri türetilir.

GQRE, GfE'nin seçtiği modele özgü Lagrangian'dır. Fiziksel metriği, madde ve eğrilik tarafından indüklenen daha yüksek mertebeli bir metrikle karşılaştırmak için kuantum görelî entropi fikrini uyarlar. Ona entropi denmesi, sıradan ısı entropisi olduğu anlamına gelmez.

Görelî entropi genellikle iki olasılık dağılımının veya kuantum durumunun ayırt edilebilirliğinin ölçüsüdür. GfE'de karşılaştırma fiziksel metrik ile madde ve eğrilik tarafından indüklenen daha yüksek mertebeli metrik arasındadır. "Daha yüksek mertebeli" ek uzayzaman boyutları anlamına gelmez. Modelin skaler, vektör-tipi ve bivektör-tipi geometrik sektörleri genişletilmiş tek bir nesnede topladığı anlamına gelir. Dinamik bir **G-alanı** bu bileşenleri birbirine bağlar ve modelin hem yerçekimi hem madde bölümlerinde kullanılan metriği "giydiren". Çerçeve, düşük enerji ve küçük eğrilik sınırında eylemi genel göreliliğin Einstein-Hilbert eylemi artı madde eylemine indirgenecek şekilde kurulmuştur.

Bu son cümle kolayca fazla yorumlanabilir. Einstein denklemlerini bir sınırdan geri kazanmak öneri için bir tutarlılık hedefidir. Doğanın bu sınırın dışında daha büyük kuramı kullandığını göstermez.

GfE alan denklemleri ayrıca çerçevenin **ortaya çıkan etkin karanlık enerji terimi** dediği dinamik bir terim içerir. Bu makalede Bianconi, modelin iç enerji yoğunluğunu bu terimle özdeşleştiriyor. "Etkin karanlık enerji", denklemlerdeki rolünü tanımlar. Kozmolojik gözlemlerden çıkarılan karanlık enerjiyle deneysel bir özdeşleştirme değildir.

"Entropi" sözcüğünün üç farklı kullanımı

Sıradan termodinamik entropi, bir makroskopik durumu kaç mikroskopik düzenlemenin oluşturabileceğini sayar. **Kuantum görelî entropi**, iki kuantum durumunun ne kadar ayırt edilebilir olduğunu ölçer. Bu makaledeki **GQRE**, görelî entropiden esinlenen ve yerçekimi Lagrangian'ı olarak kullanılan modele özgü geometrik bir yapıdır. Benzer adlar bu nicelikleri birbirinin yerine kullanılabilir yapmaz; makale kullandığı bağlantıları GfE içinde türetilir.

Model içindeki kesin termodinamik sonuç

Makale önce GfE çerçevesinin kendi düzeyinde çalışır. k ile indekslenen her geometrik serbestlik derecesi mertebesi ve tipi için şunları tanımlar:

- GQRE'den yerel bir k-entropisi;
- modelin iç enerji yoğunluğundan yerel bir k-enerjisi;
- eşlenik bir k-sıcaklığı;
- ve bir k-basıncı.

Bu nicelikler yerel bir birinci yasaya uyar. Makalenin gösterimiyle,

$$\delta\epsilon_k = \theta_k \delta s_k - \pi_k \delta v$$

k indisi farklı maddelerin veya Evren çağlarının listesi değildir. Homojen ve izotropik hesaplamada beş girdiyi etiketler: bir skaler girdi; vektör-tipi sektörden ayrı zamansal ve uzamsal girdiler; bivektör-tipi sektörden ayrı zaman-uzay ve uzay-uzay girdileri. Skalerin yön indeksi yoktur, vektör-tipi girdiler zamansal ve uzamsal yönleri ayırır ve bivektör yön çiftlerinden oluşturulur. Her sektör kendi sıcaklığını ve basıncını taşıyabilir. k -sıcaklığı, ilgili G -alanı bileşenine bağlı olarak pozitif veya negatif de olabilir.

Bunlar kozmolojik bir ufkun yanına termometre yerleştirilerek ölçülen sıcaklıklar değildir. Standart de Sitter kuantum alanı sıcaklığı H ile ölçeklenir: **Gibbons-Hawking sıcaklığı** kozmolojik ufka atanan sıcaklıktır; **Bunch-Davies vakumu** ise alan korelasyonları ilgili termal yanıtı veren standart de Sitter-invariant kuantum durumudur. Makale bunların ikisini de, de Sitter örneğinde H^2 ile ölçeklenen geometrik k -sıcaklıklarından açıkça ayırır. Burada “sıcaklık”, modelin entropi ve enerji tanımlarından türetilen termodinamik eşlenik değişkenin adıdır.

Dolayısıyla birinci yasa özdeşliği gerçek bir türetimdir, ancak **modelin kendi varsayımlarından çıkan bir sonuçtur**: GfE eylemini ve tanımlarını kabul ederseniz bu termodinamik yapı ortaya çıkar.

Friedmann hesabı neden yaklaşık

Biçimsel yapıyı kozmolojik bir örneğe dönüştürmek için makale homojen ve izotropik Friedmann-Robertson-Walker (FRW) uzayzamanlarını kullanıyor. “Homojen”, büyük ölçekli modelin her konumda aynı ortalama özelliklere sahip olması; “izotropik” ise her yönde aynı görünmesi anlamına gelir. Tek bir ölçek faktörü uzaklıkların zamanla nasıl büyüdüğünü tanımlar, madde düzgün bir mükemmel akışkan olarak temsil edilir ve Hubble parametresi H genişleme hızını özetler. Bu idealize bir arka plandır, tek tek galaksilerin haritası değildir.

Ama yapısal bir uyumsuzluk vardır. Friedmann evrenleri Einstein denklemlerini çözer. Genel olarak, skaler, vektör-tipi ve bivektör-tipi sektörleri ve G -alanının türevlerini de izleyen tam yüksek mertebeli GfE denklemlerini çözmezler. Einstein denklemleri yalnızca önerinin birinci mertebe, düşük enerji ve küçük eğrilik sınırında yeniden ortaya çıkar.

Makale bunu doğrudan söylüyor ve Friedmann çözümlerini, daha tam bir kuramda ortalama-alan çözümü yerleştirilip yaklaşımın nerede güvenilir kaldığının sınanmasına benzetilen bir yaklaşımla, yaklaşık çözümler olarak ele alıyor. Rejim, l_P Planck uzunluğu olmak üzere $l_P H \ll 1$ ile özetlenen düşük enerji ve küçük eğrilik gerektiriyor. İkinci koşul, indüklenen yüksek mertebeli metrik ile fizik-

sel yüksek mertebeli metriğin tersinin çarpımının pozitif tanımlı kalmasını gerektiriyor.

Dolayısıyla sonuç “GfE Evrenimizin tarihini öngörüyor” değildir. Daha çok şudur: **bir GfE evreni bildik bir Friedmann kozmolojisiyle yeterince iyi yaklaşıklandırılıbiliyorsa, tam GfE nicelikleri bu termodinamik ölçeklenmeleri üretir.**

Yerel ile toplam arasındaki sonuç

Bu rejim içinde öncü yerel niceliklerin basit ölçeklenmeleri vardır:

- model entropi yoğunluğu H^2 ile ölçeklenir;
- model enerji yoğunluğu H^4 ile ölçeklenir;
- de Sitter olmayan Friedmann örneklerinde geç zamanlarda bunlar yaklaşık t^{-2} ve t^{-4} olur.

Dolayısıyla evren genişledikçe iki yoğunluk da düşer. Ama yoğunluk toplam değildir.

Makale genişleyen uzayzaman bölgesi üzerinde integral aldığında büyüyen hacim sonucu değiştirir. Fiziksel olarak tanıdık madde-egemen ve radyasyon-egemen örneklerde, birim hacim başına entropi azalırken toplam entropi zamanla artar. Toplam enerji büyümeye devam etmez; öncü mertebede bir sabite yaklaşır.

Bu makalenin kavramsal olarak en yararlı sonucudur. Yerel düzenlenme ya da seyrelme, küresel ikinci yasayla otomatik olarak çelişmez. Uzayzaman hacmi daha hızlı büyüdüğü için bir bölgenin birim hacim başına yerel entropisi azalırken entegre toplam entropi artabilir.

Hesaplama bunun gerçek Evren'deki termodinamik zaman okunun doğru mikroskobik açıklaması olduğunu kanıtlamaz. Önerilen çerçevenin Friedmann yaklaşımında yerel-küresel ayrımını çelişkisiz biçimde barındırabildiğini gösterir.

de Sitter karşılaştırması, ama farklı bir sıcaklıkla

Makale ayrıca H 'nin sabit olduğu idealize üstel genişleyen uzayzaman olan de Sitter uzayını ele alıyor. Tek bir gözlemci için yalnızca sonlu bir **nedensel elmas** üzerinde integral alıyor: daha erken bir olayın gelecek ışık konisi ile daha geç bir olayın geçmiş ışık konisinin kesişimi; bu, ikisi arasında gözlemlere katılabilecek uzayzaman bölgesini sınırlar. Bu elmas üzerinde toplam GfE entropisi, tanıdık Gibbons-Hawking entropisiyle aynı H -ölçeklenmesine sahip olacak şekilde H^{-2} ile ölçeklenir. Toplam GfE enerjisi modelin birimlerinde bir mertebesindedir.

Tek bir kozmolojik arka plan ailesi

FRW, homojen ve izotropik geometriler ailesidir; başka bir yer değildir. Madde-egemen ve radyasyon-egemen evrenler, modeli neyin doldurduğuna göre ayrılan FRW örnekleridir. de Sitter uzayı da FRW biçiminde yazılabilir, ancak sabit H ve üstel genişlemeye sahip vakum-egemen bir durumu temsil eder. Nedensel elmas, o uzayzaman içinde tek gözlemci için seçilen sonlu bir bölgedir; başka tür bir evren değildir.

Aynı ölçeklenmeyi elde etmek aynı fiziksel nesneyi türetmek demek değildir. İlişkili GfE k-sıcaklığı H^2 ile ölçeklenir; standart de Sitter sıcaklığı ise H ile ölçeklenir. Makale bu farkı, k-sıcaklığının o arka planda yaşayan kuantum alanlarına değil uzayzaman geometrisine ait olduğunun işareti olarak yorumluyor.

Ardından böyle bir sıcaklığın sıradan parçacık yayımı yerine graviton radyasyonu ile *ilişkili olabileceğini* öneriyor. Bu makalenin sonucu değil, gelecekte yanıtlanacak bir sorudur. Sıcaklıkların gerçekten radyasyona karşılık gelip gelmediğini ortaya koymak için önce kuramın kuantize edilmesi gerekir.

Bunun kanıtlamadığı şeyler

- Yerçekiminin entropiden ortaya çıktığını gözlemsel olarak **göstermiyor**.
- Modelin etkin teriminin kozmolojide ölçülen karanlık enerji olduğunu **ortaya koymuyor**.
- Genel göreliliği test edilmiş üstün bir kuramla **değiştirmiyor**. Genel görelilik burada önerinin düşük enerji, küçük eğrilik sınırı olarak görünür.
- Friedmann kozmolojilerini GfE'nin tam çözümleri **yapmıyor**. Bunlar modelin termodinamik davranışını tahmin etmek için kullanılan yaklaşımdır.
- Uzayzaman serbestlik derecelerinin eksiksiz bir mikroskobik sayımını **türetmiyor**.
- Tamamlanmış bir kuantum yerçekimi kuramı sunmuyor veya graviton **tespit etmiyor**.
- Negatif k-sıcaklıklarının sıradan negatif termometre okumaları olduğunu **göstermiyor**.

Sonuç ne kadar güçlü?

Bu hakemli kuramsal bir makaledir; dolayısıyla burada “kanıt” bir deneydekinden farklı bir şey ifade eder. Uygun sorular, tanımların tutarlı olup olmadığı, türetimlerin izlenip izlenemediği ve yaklaşımların açıkça belirtilip kontrol edilip edilmediğidir.

Bu düzeyde makale GfE için somut bir termodinamik sözlük sağlıyor ve yalnızca benzetmeye dayanmak yerine birinci yasa yapısını türetiyor. Ayrıca yaklaşım sınırını alışılmadık derecede görünür kılıyor: Friedmann çözümleri genel görelilikten ödünç alınıyor, GfE niceliklerine yerleştiriliyor ve indüklenen metriğin iyi davrandığı bir rejimle sınırlandırılıyor.

Daha büyük fiziksel iddialar açık kalıyor. Çerçeve yeni, bu makale kozmolojisini verilerle karşılaştırmıyor ve en ilginç sonuçlarının bazıları — kuantizasyon, temas-geometrik dinamik ve olası graviton

radasyonu — gelecek çalışmaların yönleri olarak sunuluyor. İç tutarlılık yeni bir yerçekimi kuramı için gereklidir. Kuramın doğayı tanımladığını göstermek için yeterli değildir.

Neden önemli

Yerçekimi ile termodinamik arasındaki ilişki kara delik entropisinden de Sitter uzayının sıcaklığına kadar eski ve derindir. Bu sonuçların çoğu ufuklar çevresinde düzenlenir. GfE ise bunun yerine madde ile geometri arasındaki ilişkiden doğrudan yerel ve hacimsel bir bilgi ölçüsü kurmaya çalışır.

Bu önerinin ayakta kalıp kalmayacağı açık bir sorudur. Ancak termodinamik çalışma bu tür her kuram için yararlı bir hedef ortaya çıkarır: genişleyen bir evrende yerel yapı ve düşen yerel entropi yoğunluğunun artan toplam entropiyle nasıl birlikte var olabileceğini açıklamalıdır.

Bu makale bunun gerçekleşebileceği matematiksel olarak açık bir yolu gösteriyor. Değeri, yerçekimi-entropi problemini kapatması değildir. Problemin bir bölümünü varsayımları, sınırları ve sonraki testleri açıkça belirtilebilen denklemlere dönüştürmesidir.

Kısa özet

Bianconi, geometrik kuantum göreliliği entropiye dayalı önerilmiş değiştirilmiş yerçekimi çerçevesi Gravity From Entropy içinde termodinamik bir betimleme türetiyor. Modelin yerel entropi, enerji, sıcaklık ve basınç değişkenleri birinci yasaya uyuyor. Tam GfE nicelikleri düşük enerji, küçük eğrilik Friedmann yaklaşımlarında değerlendirildiğinde, evren genişledikçe yerel entropi ve enerji yoğunlukları düşerken uzayzaman hacminin büyümesi toplam entropiyi artırıyor; madde- ve radyasyon-egemen örneklerde toplam enerji öncü mertebede bir sabite yaklaşıyor. Bir de Sitter nedensel elması H^{-2} ile ölçeklenen entropi veriyor, ancak standart ufuk sıcaklığından farklı bir model sıcaklığına sahip. Bunlar GfE içindeki koşullu matematiksel sonuçlardır; yerçekiminin entropiden geldiğine dair gözlemsel kanıt, karanlık enerjinin ölçümü veya tamamlanmış bir kuantum yerçekimi kuramı değildir.

Kaynaklar

Ginestra Bianconi, Thermodynamics of the gravity from entropy theory, Physical Review D 114, 024042 (2026)
<https://doi.org/10.1103/26kn-thgp>