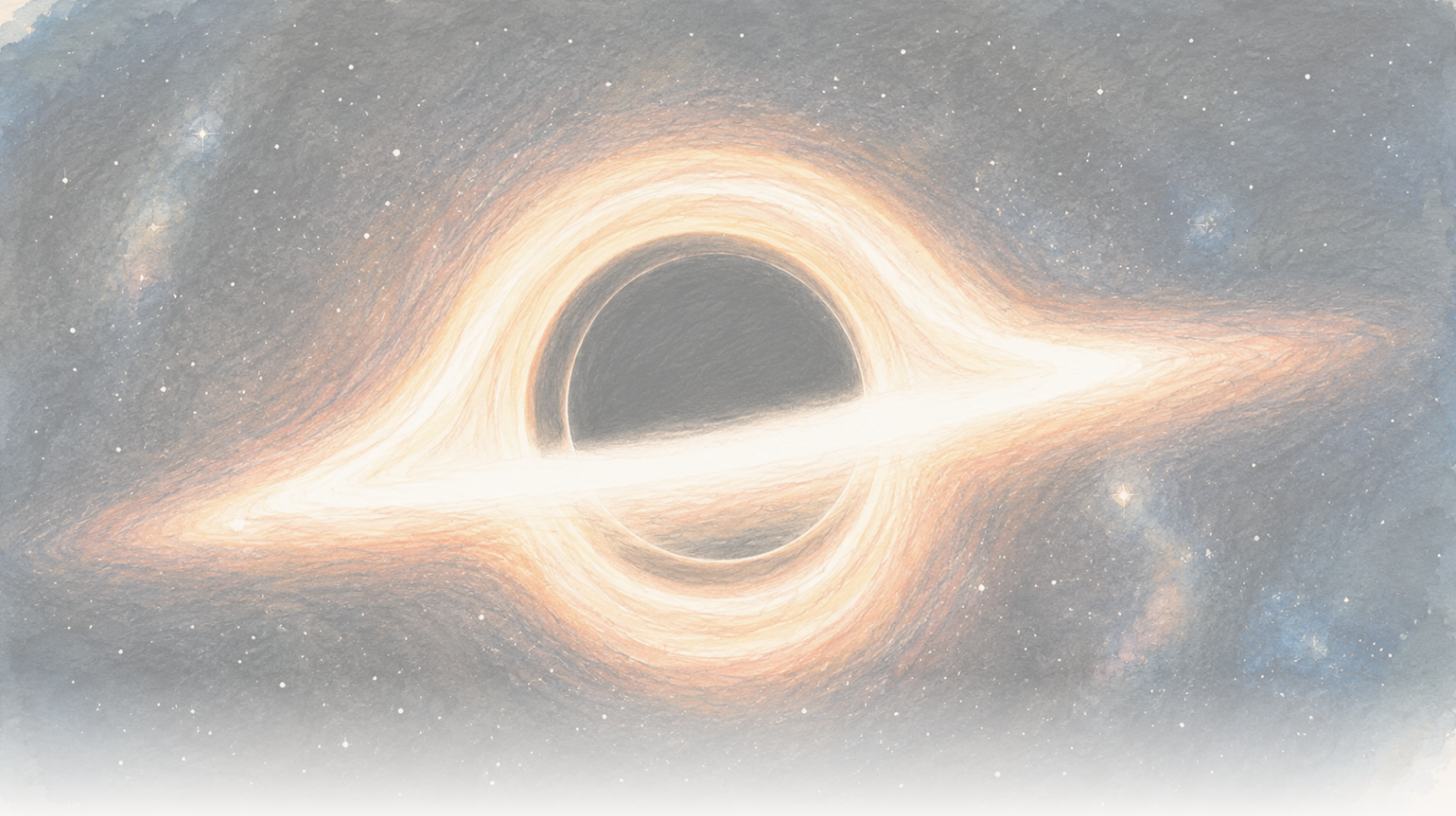




The CLEAN PAPER

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

Kara delikler termodinamik ‘yasalara’ uyuyor — yeni bir sonuç bunları dengeden şiddetle uzak kara deliklere genişletiyor

1970’lerden beri kara deliklerin termodinamiği andıran yasalara uyduğu biliniyor, ancak en temiz sürüm yalnızca dengede sessizce duran kara deliklere uygulanıyordu. Yeni bir Physical Review Letters makalesi, yerel olarak tanımlanan ‘dinamik ufukları’ kullanarak birinci ve ikinci yasayı hızlı değişen — madde yutan, birleşen, ısıyı yayan — kara deliklere genişletiyor. Böylece fizikçiler şiddetle evrilen bir kara deliğe bile sıcaklık ve entropi atayabiliyor. Bu, klasik genel görelilikte matematiksel bir sonuçtur; yeni kuantum kütleçekimi değil, gözlem değil ve kara delik bilgi bilmesinin çözümü değil.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Thermodynamics of Black Holes, Far from Equilibrium*, Abhay Ashtekar, Daniel E. Paraizo, Jonathan Shu, Physical Review Letters 136, 251405 (2026) · DOI: 10.1103/3c1r-v8f1

Kara deliklerin termodinamiğe benzeyen “yasaları” var. Düzenli sürüm, ancak hiçbir şey olmuyorken çalışıyordu

Fizikteki en tuhaf gerçeklerden biri, kara deliklerin sıcak cisimler gibi davranmasıdır. 1970’lerin başında Bekenstein ve Hawking, kara delikleri yöneten denklemlerin termodinamik yasalarıyla terim terim örtüştüğünü fark etti: bir kara deliğin entropisi ufkunun alanıyla, sıcaklığı ise yüzey kütteleçkimiyle orantılıdır. Hawking daha sonra sıcaklığın en derin anlamıyla gerçek olduğunu gösterdi — kara delik gerçekten, çok zayıf da olsa, termal ışıınım yayar.

Hawking ışıınımı nedir?

Klasik olarak kara delikten hiçbir şey kaçamaz; dolayısıyla tamamen siyah olması ve hiç sıcaklığı bulunmaması gerekir. Stephen Hawking 1974’te, ufuk yakınında kuantum kuramı hesaba katıldığında bunun değiştiğini gösterdi: kara delik zayıf bir termal parıltı yayar ve böylece yavaşça kütle kaybeder, yani “buharlaştır”. Tayf Hawking sıcaklığında termaldir; eğri uzay-zamanda yayılım ise sonsuz uzaklığa ulaşan ışıınımı değiştirir. Yaygın bir sezgisel resimde — Hawking’in gerçek türetimi bu değildir — ufkun hemen dışındaki kuantum dalgalanmaları çiftler oluşturur; eşlerden biri ışıınım olarak kaçır, diğeri içeri düşer.

Temel özellik, bu sıcaklığın kara deliğin kütlesiyle *ters* orantılı olmasıdır: delik ne kadar küçükse o kadar sıcaktır. Bir teleskobun görebileceği herhangi bir kara delik için sıcaklık akıl almaz derecede düşüktür — çevresindeki boş uzaydan bile çok daha soğuk — dolayısıyla pratikte parıltı tamamen ihmal edilebilir ve doğrudan hiç ölçülmemiştir. Önemi kavramsaldır: Hawking ışıınımı kara delik mekaniği ile termodinamik arasındaki *benzerliği* gerçek termodinamiğe dönüştüren şeydir. Delik gerçekten bir sıcaklığa sahip olduğu için bu yasalardaki “sıcaklık” ve “entropi” yalnızca biçimsel bir rastlantı değil, gerçek termodinamik niceliklerdir. (Bu, mevcut makalenin sonucu değil, arka plan bilgisidir.)

Bu karşılık, **kara delik mekaniğinin birinci yasası** denen sonuca dayanır (Bardeen, Carter ve Hawking, 1973). Sözcüklerle ifade edilirse: bir kara deliği bir kararlı durumdan yakındaki başka bir kararlı duruma hafifçe iterseniz, kütlesindeki değişim sıcaklığının entropi değişimiyle çarpımına, ayrıca dönmesini temsil eden bir terime eşittir. “Giren ısı = sıcaklık $\times$ entropi değişimi” ifadesinin kara delik karşılığıdır.

Ama *yakındaki kararlı durum* ifadesinde saklı bir sorun var. Temiz 1973 yasası, dengede sessizce duran ve yalnızca sonsuz küçük miktarda farklı iki kara deliği karşılaştırır. Gerçekte hiçbir **süreci** tarif etmez — bir yıldızı yutan kara delik, birleşen iki kara delik, şiddetli bir doğumdan sonra çınlayarak sakinleşen yeni bir delik. Bunlar tam da en çok anlamak istediğimiz durumlar ve “sessizce durmanın” tam tersidir. Düzenli yasa, kara delik tam ilginçleştiği anda susar.

Bariz çözüm neden çalışmıyor?

Çözüm kolay görünebilir: madde içeri düşerken ufkun büyümesini izleyin. Sorun, *hangi* ufuk olduğu.

Çoğu insanın gözünde canlanan ufuk — gerçek geri dönüşsüzlük sınırı olan **olay ufku** — ince ve rahatsız edici bir özelliğe sahiptir: evrenin bütün geleceğiyle tanımlanır. Olay ufkunun *şu anda* nerede olduğunu bilmek için, deliğe sonsuza kadar düşecek her şeyi bilmeniz gerekir. Bu teknik bir ayrıntı değildir. Bir olay ufku, onu besleyecek madde daha gelmeden *önce*, tamamen boş ve düz bir uzay bölgesinde büyümeye başlayabilir; sırf o madde gelecekte oraya varacağı için. Alanı, yerel olarak hiçbir şeyin olmadığı yerde büyüyebilir.

Bir ufuk, madde gelmeden önce nasıl büyüyebilir?

Bu bilmecenin bilimsel adı **olay ufkunun teleolojik doğası**, diğer adıyla **küresel tanımıdır**. Burada “teleolojik”, ufkun bir amacı olduğu, geleceği öngördüğü veya zamanda geriye doğru bir etki gönderdiği anlamına gelmez. Bir olayın ufkun içinde olup olmadığına ancak uzay-zamanın tamamlanmış gelecekteki geçmişi kullanılarak karar verilebildiği anlamına gelir.

Biçimsel tanım da aynı şeyi daha kısa söyler. **Gelecekteki ışıksonsuzluğunu** — “I-plus” denilen ve $\mathcal{I}^+$ ile yazılan kavramı — sonsuza kadar kaçan ışığın, aksi hâlde boş ve sonsuz uzak bir gelecekte ulaştığı hedef gibi düşünün. Olay ufku, dışarı doğru gönderilen bir ışık sinyalinin sonunda bu hedefe ulaşabildiği olaylarla hiçbir sinyalin *asla* ulaşamadığı olaylar arasındaki sınırdır. Genel göreliliğin standart gösteriminde gelecekteki ışıksonsuzluğunun nedensel geçmişinin sınırıdır: $\partial\mathcal{J}^-(\mathcal{I}^+)$. “Asla/hiçbir zaman” sözcüğü tanımın içine gömülü olduğu için yalnızca burada ve şimdi yapılan hiçbir ölçüm olay ufkunun yerini tam olarak belirleyemez.

Çöken küresel bir kabuk bu tuhaflığı görünür kılar. Kabuk gelmeden önce iç bölge boş ve yerel olarak düz olabilir. Merkezden giderek daha geç zamanlarda dışarı ışık ışınları gönderin: erken ışınlar kaçır, geç olanlar çöken kabukla, artık çıkamayacakları bir geometrinin içinde karşılaşır. Olay ufku bu iki sonucu ayıran sınırdır. Geriye doğru izlenirse bu sınır merkezde başlar ve kabuk ona ulaşmadan önce hâlâ boş ve düz olan iç bölgede genişler. Büyüyen alanı oradaki yerel madde akışını bildirmez; tamamlanmış uzay-zamanda hangi kaçış yollarının açık kaldığını kaydeder.

Bu resimde hiçbir şey zamanda geriye doğru etki etmez. Kabuk başka yöne saptırılrsa ve kara delik oluşmasa tamamlanmış uzay-zaman farklı olurdu; daha önceki bölge de olay ufkunun parçası olmazdı. Ders, geleceğin geçmişi değiştirdiği değil; olay ufkunun yakındaki bir gözlemcinin tek bir anda saptayabileceği bir yüzey değil, **küresel nedensel sınır** olduğudur. Fizikçilerin değişen bir kara deliği izlemek gerektiğinde yarı-yerel ya da dinamik ufuklar kullanmasının nedeni tam olarak budur.

Bu özellik olay ufkunu kara deliğin “durumunun” anlık kaydı olarak işe yaramaz hâle getirir. Bilgisayar simülasyonunda bile simülasyon bitmeden yerini belirleyemezsiniz; sıcaklığı veya entropiyi an be an izlemek için ise hiç kullanamazsınız.

Hamle: yerel olarak tanımlayabileceğiniz bir ufuk

Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo ve Jonathan Shu’nun yeni makalesi sonucunu farklı bir ufuk kavramı üzerine kuruyor — yalnızca kendi yakın çevresindeki geometriyle, sonsuz geleceğe başvurmadan tanımlanan **yarı-yerel** bir ufuk. Bu “dinamik ufuk parçaları”, sayısal görelilikçilerin

birleşme simülasyonlarında kara delikleri bulmak için zaten kullandığı yüzeylerdir; çünkü yerel ve dürüsttüler: alanları yalnızca gerçekten enerji üzerlerinden geçtiğinde büyür.

Bunun üzerine yazarlar problemin daha zor yarısını çözüyor. Olağan termodinamikte dengeden uzak bir sistem meşhur derecede kaygandır: tek bir sıcaklık veya basınç atamak temiz değildir, çünkü bu nicelikler ancak sistem oturduğunda iyi tanımlanır. Kara deliklerde de aynı sorun vardır — ta ki yazarların gösterdiği gibi genel göreliliğin özel bir özelliğini kullanana kadar. Dengedeki bir kara delik (bir Kerr kara deliği) yalnızca iki sayıyla belirlenir: boyutu ve dönmesi. Yazarlar bu nedenle, çılgınca evrilen dengeden-uzak herhangi bir ufku alıp her anda onun o an benzediği denge kara deliğinin iki sayısını okuyan bir eşleme kuruyor. Bu eşleme sayesinde şiddetle değişen bir kara deliğe bile **zamana bağlı sıcaklık ve dönme** atanabiliyor.

Bu parçalarla — ufuktan yerel olarak tanımlanan enerji akışı ve anlık yoğun nicelikler — birinci yasayı dengeden keyfi ölçüde uzak kara deliklere genişletiyorlar. En önemlisi yeni yasa, donmuş iki durum arasındaki sonsuz küçük adımları değil, **gerçek fiziksel süreçlerin** (madde ve kütteleçkim dalgalarının ufku geçmesinin) neden olduğu sonlu değişimleri tarif ediyor. Bunun yanına eşleşen bir ikinci yasa koyuyorlar; artık ifade *nicel*: ufuk alanı, içeri akan enerjiye doğrudan bağlı bir miktarda büyüyor. Birinci ve ikinci yasa birlikte tek ve temiz bir sonuca işaret ediyor — hayal edilebilecek en şiddetli olayın ortasındaki bir kara delik için bile doğru entropi ölçüsü hâlâ ufkun alanıdır.

Bu çalışma neyi kanıtlamıyor?

- **Kuantum kütteleçkimini çözmiyor.** Bu, ufuk alanının entropiyle standart özdeşleştirilmesini kullanan *klasik* genel görelilik sonucudur. Entropiyi daha temel bir şeyden türetmez.
- **Mikrodurumları saymıyor veya kara deliğin entropisinin neyden oluştuğunu açıklamıyor.** Kara delik termodinamiğinin muhasebesini genişletiyor; kutuyu açıp mikroskobik serbestlik derecelerini göstermiyor.
- **Kara delik bilgi paradoksunu çözmiyor.** Bu bilmece kuantum kuramında yaşar; makale ona dokunmuyor.
- **Gözlem veya ölçüm değil.** Teleskop, veri veya kütteleçkim dalgası sinyali yok — bu matematiktir. Burada birleşen bir kara deliğin “sıcaklığı”, denklemlerde kesin tanımlanmış bir niceliktir; termometreyle okuyabileceğiniz bir şey değil.
- **Bekenstein ve Hawking’i devirmiyor.** Onların tablosunu, özgün denge yasasının söyleyecek bir şeyi olmadığı dinamik rejime *genişletiyor*.

Kanıt ne kadar güçlü?

Kendi türü açısından güçlü: alanın önde gelen bir grubundan, dikkatli ve içsel olarak tutarlı bir matematiksel fizik çalışması; Physical Review Letters’ta *Editors’ Suggestion* olarak yayımlandı (eşlik eden makale uzun türetimleri ayrıntılandırıyor).

Dürüst çekinceler kaliteden çok *tür* ile ilgili:

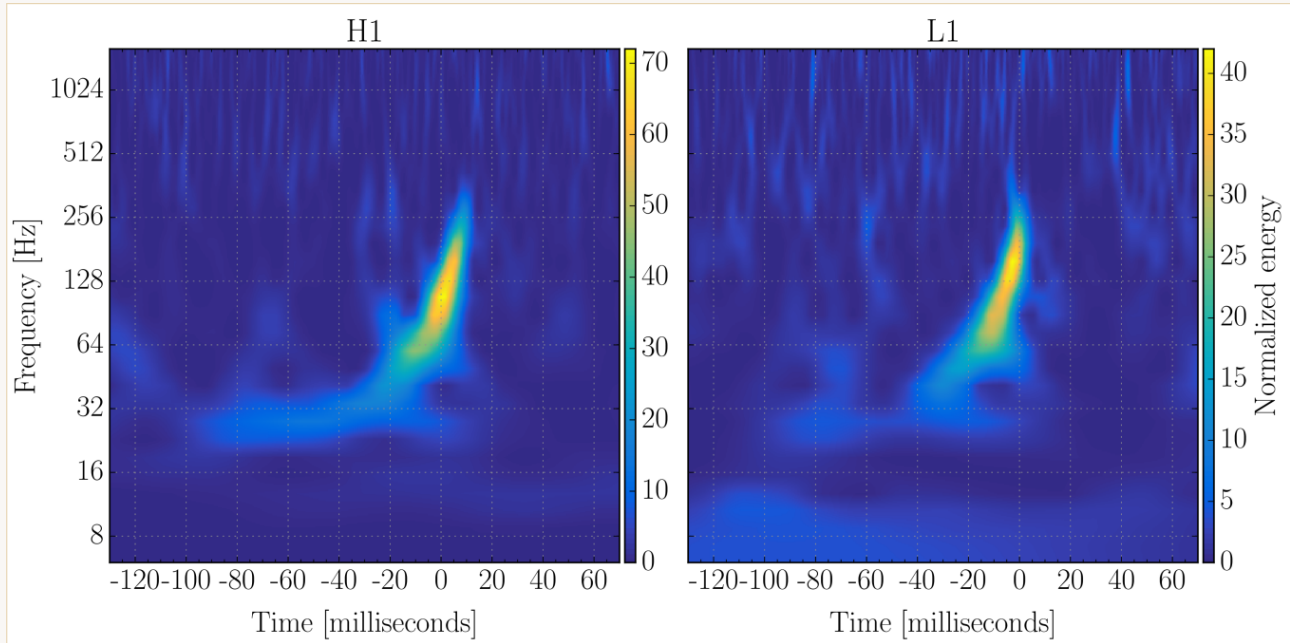
- Ufuk alanının *entropi olduğu* yönündeki geleneksel varsayıma dayanıyor (alanın Newton sabiti ve Planck sabitinin dört katına bölünmesi). Tam bir kuantum küttelekim kuramı bu özdeşleştirmeyi bir gün değiştirirse yorum da onunla birlikte değişir.
- Manşet hesaplamaları en yaygın vaka için (uzaysal dinamik ufuklar, eksenel simetri) yapılıyor; yazarlar kısıtların temel olmadığını savunuyor ancak bütünüyle genel ifade başka çalışmalarda sonuçlara dayanıyor.
- “Denge dışında da entropi = ufuk alanı” yeni birinci ve ikinci yasalarla doğal ve ikna edici hâle getirilen güçlü bir *özdeşleştirme*; mikroskobik istatistikten türetilmiş bir teorem değil.

Yani: elli yıllık bir çerçevenin titiz genişletilmesi; deneysel keşif veya test edilmeyi bekleyen yeni bir doğa yasası değil.

Neden önemli?

İki neden var; biri pratik, biri kavramsal.

Pratik olarak bugün gerçekten incelediğimiz kara delikler — LIGO ve Virgo’nun birleşirken “duyduğu” delikler — en önemli anlarını dengeden uzakta geçirir. Bu makaledeki nicelikler, simülasyonların zaten izlediği aynı yerel tanımlı ufuklardan kuruluyor; dolayısıyla birleşme veya çökme sırasında bir kara deliğin entropisi ve sıcaklığı hakkında, yalnızca önce ve sonra değil, ilkeli bir biçimde konuşmaya olanak veriyor.



Doğrudan saptanan ilk küttelekim dalgası sinyali GW150914, iki kara deliğin birleşmesinden geldi. Bu zaman-frekans haritaları sinyali LIGO Hanford (solda) ve LIGO Livingston’da (sağda) gösteriyor: iki dedektörde de parlak iz, birleşmeye doğru frekans yükseldikçe yukarı süpürülüyor. Bu, dengeden uzak bir kara delik sisteminin gerçek örneğidir; yeni termodinamik çerçeveye için bağlam sağlar, o çerçevenin gözlemsel kanıtı değildir.

LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration / Classical and Quantum Gravity, Fig. 10 CC BY 3.0

Kavramsal olarak kara deliklerin termodinamik davranışı, kuantum kütteleçkimine dair elimizdeki birkaç somut ipucundan biridir — kütteleçkimin, kuantum kuramının ve termodinamiğin gözle görünür biçimde bulunduğu yer. Şiddetle değişen bir kara delik için “entropi” ve “sıcaklık”ın tam olarak ne anlama geldiğini keskinleştirmek, gelecekteki herhangi bir kuantum kuramının vurması gereken hedefi daraltır. Kara deliğin entropisinin gerçekte ne olduğu sorusunu yanıtlamaz. Soruyu daha kesin biçimde ifade eder — fiziğin bu köşesinde işin büyük kısmı da budur.

Kısa özet

Kara delikler termodinamiği andıran yasalara uyar, ancak temiz 1973 “birinci yasası” yalnızca dengede duran kara delikleri karşılaştırıyor ve gerçek bir süreci tarif edemiyordu. Ashtekar, Paraizo ve Shu; yerel olarak tanımlanan “dinamik ufukları” ve değişen bir kara deliğe anlık sıcaklık ile dönme atayan bir eşlemeyi kullanarak hem birinci hem ikinci yasayı dengeden keyfi ölçüde uzak — birleşen, madde yutan, çınlayarak sakinleşen — kara deliklere genişletiyor. Sonuç, şiddetli olaylar sırasında bile ufuk alanının doğru entropi ölçüsü olarak kalması. Bu, klasik genel görelilikte titiz bir sonuçtur; kuantum kütteleçkimi değil, gözlem değil, mikrodurum sayımı değil ve bilgi paradoksunun çözümü değil.

Abartısız değerlendirme

Makalenin gösterdiği: Yarı-yerel dinamik ufuklara dayanan, bütünüyle dinamik ve dengeden uzak kara delikler için kara delik mekaniğinin birinci ve ikinci yasalarının matematiksel olarak tutarlı bir genişletmesi. Sonlu, sürece dayalı birinci yasa ve nicel bir ikinci yasa tanımlıyor; dinamik kara deliğin entropisini ufuk alanıyla özdeşleştirmeyi doğal hâle getiriyor.

Gerçek ama yoruma dayalı olan: Denge dışında “entropi = ufuk alanı” özdeşleştirmesi. Yeni yasalar bunu ikna edici kılıyor, ancak türetmek yerine standart klasik alan-entropi varsayımını devralıyor.

Göstermediği: Kuantum kütteleçkim kuramı; kara delik entropisinin mikroskobik kökeni veya “sayımı”; bilgi paradoksunun çözümü; herhangi bir gözlemsel veya deneysel sonuç; fiziksel olarak ölçülebileceğiniz bir sıcaklık.

Başlıca sınırlamalar: Baştan sona klasik genel görelilik; manşet sonuçlarının yaygın uzaysal, ek-senel simetrik vaka için kanıtlanması ve genelliğin eşlik eden çalışmalarla savunulması; alan-entropi özdeşleştirmesinin istatistiksel mekanikten türetilmeyip varsayılması.

Genel okuyucu ne kadar güvenmeli? Bunun kara delik termodinamiğini gerçekten dinamik rejime genişleten sağlam ve saygın bir kuramsal ilerleme olduğuna yüksek güven. Aynı derecede yüksek güvenle şunu da söyleyebiliriz: bu yeni gözlemler hakkında bir iddia değil, kuantum kütteleçkimi değil ve ünlü bilgi bilmecesinin çözümü değil. Doğru tutum: teleskopla değil tebeşirle atılmış, anlayışta gerçek bir adım.

Kaynaklar

Ashtekar, Paraizo & Shu, Thermodynamics of Black Holes, Far from Equilibrium, Phys. Rev. Lett. 136, 251405 (2026)

<https://doi.org/10.1103/3c1r-v8f1>