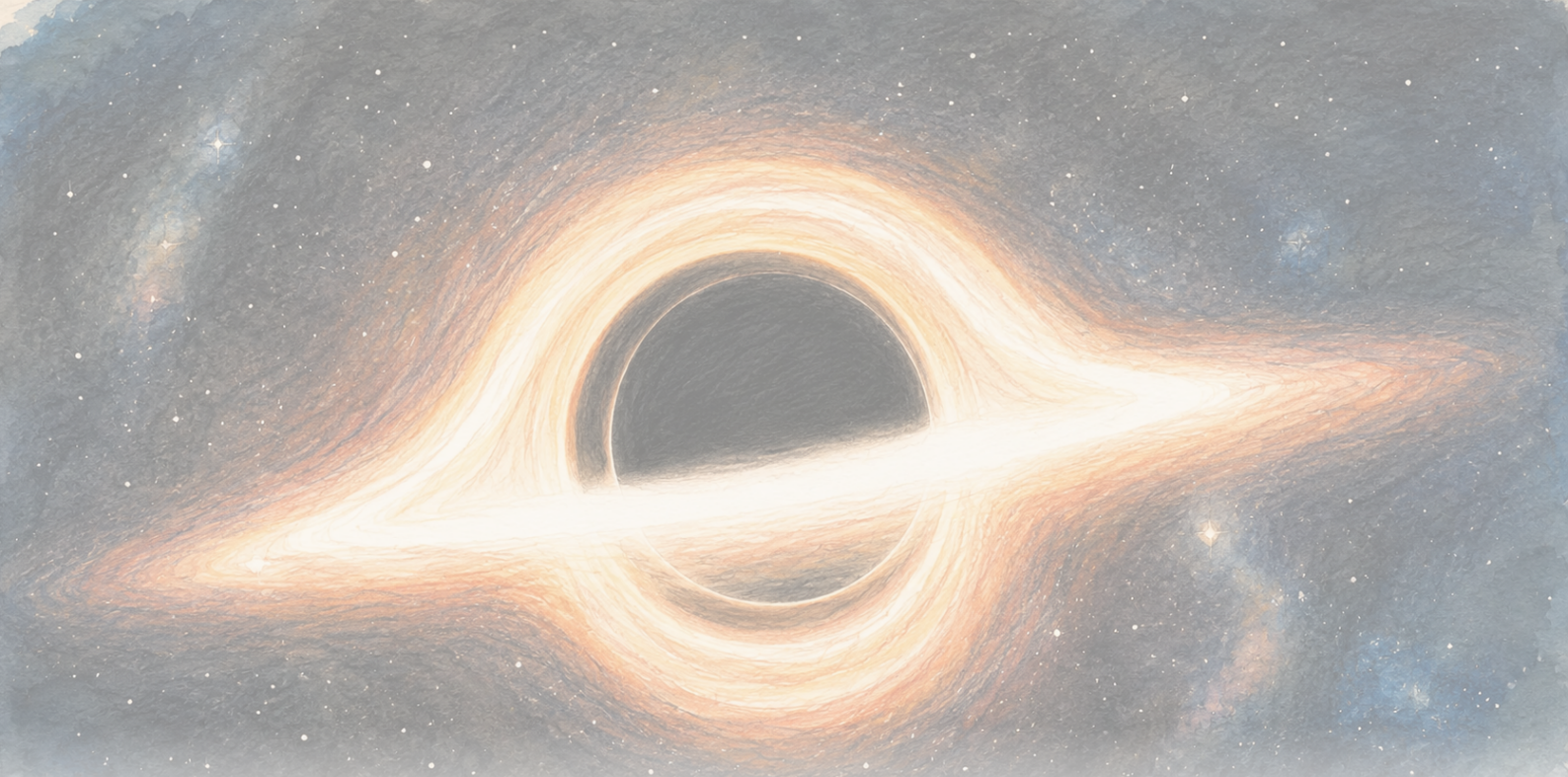




The CLEAN PAPER

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

Qara dəliklər termodinamik “qanunlara” əməl edir — yeni nəticə onları tarazlıqdan kəskin uzaq qara dəliklərə də genişləndirir

1970-ci illərdən qara dəliklərin termodinamikanı xatırladan qanunlara tabe olduğu məlumdur, lakin ən səliqəli versiya yalnız tarazlıqda sakit qalan qara dəliklərə tətbiq edilirdi. Physical Review Letters-da dərc olunan yeni məqalə birinci və ikinci qanunları kvazi-lokal üfüqlərin dinamik üfüq seqmenti sayılan və tarazlıqdan istənilən qədər uzaq ola bilən hissələrinə — akkresiya, çökmə və qara dəlik birləşməsinin əksər mərhələlərinə — genişləndirir. Simulyasiyalar kvazi-lokal üfüqü bütün birləşmə boyu izləyir, lakin qanunlar onun dinamik üfüq seqmenti olmadığı qovuşma ətrafındakı qısa müddəti hələ əhatə etmir. Əsas çərçivə ümumi nisbilikdədir və buxarlanmaya yarımklassik tətbiqi var; bu, yeni kvant qravitasiyası, müşahidə və ya qara dəlik informasiya tapmacasının həlli deyil.

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

Qara dəliklərin termodinamikaya bənzəyən “qanunları” var. Səliqəli versiya yalnız heç nə baş verməyəndə işləyirdi.

Fizikanın ən qəribə faktlarından biri qara dəliklərin isti cisimlər kimi davranmasıdır. 1970-ci illərin əvvəlində Bekenstein və Hawking qara dəlikləri idarə edən tənliklərin termodinamika qanunları ilə termin-termin uyğunlaşdığını gördülər: qara dəliyin entropiyası üfünün sahəsinə, temperaturu isə səth qravitasiyasına mütənasibdir. Sonra Hawking temperaturun ən dərin mənada real olduğunu göstərdi — qara dəlik doğrudan da çox zəif termal şüalanma ilə parlayır.

Hawking şüalanması nədir?

Klassik olaraq qara dəlikdən heç nə qaça bilməz, deməli o, tam qara olmalı və heç temperaturu olmamalıdır. 1974-cü ildə Stephen Hawking üfün yaxınlığında kvant nəzəriyyəsi nəzərə alınanda bunun dəyişdiyini göstərdi: qara dəlik zəif termal parıltı buraxır və buna görə yavaş-yavaş kütlə itirir, yəni “buxarlanır”. Spektr Hawking temperaturunda termaldır, əyri fəza-zamanda yayılma isə sonsuzluğa çatan şüalanmanı dəyişdirir. Yaygın evristik təsvirə görə — Hawking-in əsl çıxarışı bu deyil — üfün dərhal kənarındakı kvant fluktuasiyaları cütlər yaradır, bir tərəf şüalanma kimi qaçır, digəri içəri düşür.

Əsas xüsusiyyət budur ki, bu temperatur qara dəliyin kütləsi ilə *tərs* mütənasibdir: dəlik nə qədər kiçikdirsə, o qədər istidir. Teleskopla görünə biləcək istənilən qara dəliyin temperaturu fantastik dərəcədə aşağıdır — ətrafdakı boş fəzadan da soyuq — buna görə praktikada parıltı tamamilə cüzidir və heç vaxt birbaşa ölçülməyib. Əhəmiyyəti konseptualdır: Hawking şüalanması qara-dəlik mexanikası ilə termodinamika arasındakı *analogiyanı* həqiqi termodinamikaya çevirir. Dəliyin həqiqətən temperaturu olduğuna görə bu qanunlardakı “temperatur” və “entropiya” formal təsadüf yox, real termodinamik kəmiyyətlərdir. (Bu, hazırkı məqalənin nəticəsi yox, fon məlumatıdır.)

Bu uyğunluğun dayaqlarından biri **qara dəlik mexanikasının birinci qanunu** adlanan nəticədir (Bardeen, Carter və Hawking, 1973). Sözlə desək: qara dəliyi bir stasionar vəziyyətdən ona yaxın başqa stasionar vəziyyətə azca dəyişdirsəniz, kütlədəki dəyişmə temperatur vurulsun entropiyadakı dəyişmə, üstəgəl spinlə bağlı terminə bərabərdir. Bu, “daxil olan istilik = temperatur $\times$ entropiya dəyişikliyi” ifadəsinin qara-dəlik versiyasıdır.

Amma *yaxın stasionar vəziyyət* ifadəsində gizlənmiş problem var. Səliqəli 1973 qanunu tarazlıqda sakit dayanan, bir-birindən yalnız sonsuz kiçik fərqlə seçilən iki qara dəliyi müqayisə edir. O, əslində heç bir **prosesi** təsvir etmir — ulduz udan qara dəliyi, iki qara dəliyin birləşməsini, şiddətli doğuşdan sonra sönümlənmə mərhələsinə keçən yeni dəliyi. Məhz bunlar anlamaq istədiyimiz hallardır və “sakit oturmaq” anlayışının tam əksidir. Səliqəli qanun qara dəlik maraqlı olduğu anda susur.

Aydın görünən düzəliş niyə işləmir?

Düşünmək olar ki, həll sadədir: maddə içəri düşəndə üfünün böyüməsinə baxın. Problem *hansı* üfük olduğundadır.

İnsanların adətən təsəvvür etdiyi üfük — **hadisə üfüyü**, həqiqi geri dönüşsüz sərhəd — incə və narahat xüsusiyyətə malikdir: o, kainatın bütün gələcəyi ilə müəyyən olunur. Hadisə üfününün *indi* harada olduğunu bilmək üçün gələcəkdə, sonsuza qədər dəliyə düşəcək hər şeyi bilməli olardınız. Bu texniki xırdalıq deyil. Hadisə üfüyü onu qidalandıracaq maddə hələ çatmamış, tam boş və yastı fəza bölgəsində belə böyüməyə başlaya bilər — sadəcə həmin maddə gələcəkdə ora düşəcəyi üçün. Yerli olaraq heç nə baş verməyən yerdə onun sahəsi arta bilər.

Üfük maddə çatmamış necə böyüyə bilər?

Bu tapmacanın elmi adı **hadisə üfününün teleoloji təbiəti**, yaxud **global tərifi**dir. Burada “teleoloji” üfünün məqsədi olması, gələcəyi proqnozlaşdırması və ya təsiri zaman boyunca geriye göndərməsi demək deyil. O deməkdir ki, müəyyən hadisənin üfük daxilində olub-olmadığını yalnız fəza-zamanın tam gələcək tarixini bilməklə qərarlaşdırmaq olar.

Formal tərif eyni şeyi daha yığcam deyir. **Gələcək null sonsuzluğunu** — “I-plus”, I^+ — başqa cür boş olan sonsuz uzaq gələcəyə qaçan işığın çatdığı yer kimi təsəvvür edin. Hadisə üfüyü xaricə göndərilən işıq signalının nə vaxtsa həmin yerə çatma bildiyi hadisələrlə heç vaxt çatma bilmədiyi hadisələr arasındakı sərhəddir. Ümumi nisbiliyin standart notasiyasında bu, gələcək null sonsuzluğunun kauzal keçmişinin sərhədidir: $\partial J^-(I^+)$. Tərifə *heç vaxt* sözü daxil olduğu üçün yalnız burada və indi edilən heç bir ölçmə hadisə üfüyü dəqiq yerləşdirə bilməz.

Çökən sferik qabıq qəribəliyi görünən edir. Qabıq çatmazdan əvvəl onun içi boş və yerli olaraq yastı ola bilər. Mərkəzdən ardıcıl olaraq daha gec vaxtlarda xaricə işıq şüaları göndərin: əvvəlkilər qaçır, sonrakılar isə çökən qabıqla elə həndəsədə qarşılaşır ki, çıxa bilmir. Hadisə üfüyü bu iki nəticəni ayıran sərhəddir. Geriyə izləyəndə həmin sərhəd mərkəzdə başlayır və qabıq ona çatmamış hələ boş, yastı daxili bölgədə genişlənir. Böyüyən sahə oradakı yerli maddə axınını göstərmir; tamamlanmış fəza-zamanda hansı qaçış yollarının açıq qaldığını qeyd edir.

Bu təsvirin heç bir hissəsi zamanda geriye təsir etmir. Qabıq istiqamətini dəyişsə və qara dəlik yaranmasaydı, tamamlanmış fəza-zaman fərqli olardı və həmin əvvəlki bölgə hadisə üfününün hissəsi olmazdı. Dərs gələcəyin keçmişi dəyişdirməsi deyil; hadisə üfününün yaxın müşahidəçinin bir anda aşkarlaya biləcəyi səth yox, **global kauzal sərhəd** olmasıdır. Fiziklər dəyişən qara dəliyi izləmək lazım gələndə məhz buna görə kvazi-lokal və ya dinamik üfüqlərdən istifadə edir.

Bu xüsusiyyət hadisə üfüyü qara dəliyin “vəziyyəti”nin davamlı hesabı üçün yararsızdır. Kompüter simulyasiyasında belə simulyasiya bitənədək onu dəqiq yerləşdirə bilməzsiniz; hər an temperatur və ya entropiyanı izləmək üçün istifadəsi isə daha da çətindir.

Addım: yerli müəyyən edə biləcəyiniz üfük

Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo və Jonathan Shu-nun yeni məqaləsi nəticəsini fərqli üfük anlayışı — sonsuz gələcəyə istinad etmədən yalnız öz yaxınlığındakı həndəsə ilə müəyyən olunan **kvazi-lokal** üfük — üzərində qurur. Bu **kvazi-lokal üfüqlər** ədədi nisbilik mütəxəssislərinin bütün simulyasiya boyu ilkin qara dəlikləri yerləşdirmək, birləşməni izləmək və qalıq obyektı yerləşdirmək üçün artıq istifadə etdikləri səthlərdir. Burada işlənib hazırlanmış termodinamik qanunlar kvazi-lokal üfüğün **dinamik üfük segmenti** olmaq üçün əlavə şərtləri ödəyən hissələrinə tətbiq olunur. Belə hər segmentdə sahə uzaq gələcəkdəki hadisələrə deyil, yerli enerji selinə birbaşa cavab olaraq dəyişir: müsbət daxilə axın zamanı artır, mənfi enerji seli olan buxarlanan zamanabənzər üfüqdə isə azalır.

Bunun üzərinə müəlliflər problemin daha çətin yarısını həll edirlər. Adi termodinamikada tarazlıqdan uzaq sistemi təsvir etmək olduqca çətinidir: ona tək temperatur və ya təzyiq təyin etmək mümkün deyil, çünki bu kəmiyyətlər yalnız sistem sabitləşəndə aydın müəyyən olunur. Qara dəliklərdə də eyni problem var — müəlliflərin göstərdiyinə görə, ümumi nisbililiyin xüsusi xüsusiyyətindən istifadə edəndə. Tarazlıqda olan qara dəlik (Kerr qara dəliyi) yalnız iki rəqəmlə müəyyən olunur: ölçüsü və spini. Müəlliflər buna görə dinamik üfük segmenti boyunca hər bir vəziyyəti götürən və həmin segmentin hər kəsiyində vəziyyətin o anda bənzədiyi tarazlıq qara dəliyinin iki rəqəmini oxuyan xəritə qururlar. Bu xəritə vasitəsilə şiddətlə dəyişən qara dəliyə segment boyunca **zamandan asılı temperatur və spin** təyin etmək mümkün olur.

Bu elementlərlə — üfüqdən keçən, lokal müəyyən edilmiş enerji və ani intensiv kəmiyyətlərlə — onlar birinci qanunu tarazlıqdan istənilən qədər uzaq qara dəliklərə genişləndirirlər. Ən əsası, yeni qanun iki donmuş vəziyyət arasındakı sonsuz kiçik addımları deyil, **real fiziki proseslərin yaratdığı sonlu dəyişiklikləri** (maddə və qravitasiya dalğalarının üfüqdən keçməsinə) təsvir edir. Onlar bunu ifadəsi artıq *kəmiyyət xarakterli* olan uyğun ikinci qanunla birləşdirirlər: üfük sahəsindəki dəyişiklik yerli enerji seli ilə birbaşa əlaqəlidir — müsbət daxilə axın zamanı böyümə, mənfi sel zamanı isə buxarlanan zamanabənzər üfük üçün azalma baş verir. Birinci və ikinci qanun birlikdə vahid, aydın nəticəyə gətirir: dinamik üfük segmenti ilə təmsil olunan istənilən mərhələdə, nə qədər şiddətli olursa olsun, entropiyanın düzgün ölçüsü yenə üfüğün sahəsidir.

Bu nəyi sübut etmir?

- Bu, **kvant qravitasiyasını həll etmir**. Əsas çərçivə ümumi nisbilikdə formalaşdırılıb; onun qara dəliklərin buxarlanmasına tətbiqi kvant maddə sahələrinin klassik fəza-zamana təsir etdiyi yarımklassik yaxınlaşmadan istifadə edir. O, entropiyanı daha fundamental bir şeydən çıxarmaq əvəzinə, üfük sahəsinin entropiya ilə standart eyniləşdirilməsini yenə qəbul edir.
- **Mikrovəziyyətləri saymır və qara dəlik entropiyasının nədən yarandığını izah etmir**. Qara-dəlik termodinamikasının hesabını genişləndirir; qutunu açıb mikroskopik sər-

bəstlik dərəcələrini göstərmir.

- **Qara-dəlik informasiya paradoksunu həll etmir.** Bu tapmaca kvant nəzəriyyəsində yaşayır; məqalə ona toxunmur.
- Bu, **müşahidə və ya ölçmə deyil.** Heç bir teleskop, məlumat və ya qravitasiya-dalğası signalı iştirak etmir — bu, riyaziyyatdır. Qara dəlik təkamül etdikcə dinamik üfüqə aid edilən “temperatur” termometrlə oxuna biləcək bir şey deyil, tənliklərdə dəqiq müəyyən edilmiş kəmiyyətdir.
- Bu, iki qara dəliyin bütün qovuşması üçün **hələ** fasiləsiz termodinamik təsvir vermir. Ədədi simulyasiyalar kvazi-lokal üfüqü bütün təkamül boyunca — ilkin qara dəliklərdən birləşmə vasitəsilə qalıq obyektə qədər — izləyir, lakin birləşməyə çox yaxın qısa müddət ərzində bu üfüq dinamik üfüq segmenti üçün tələb olunan şərtləri ödəmir. Yanaşı məqaləyə görə, həmin müddətin termodinamik təsviri üzərində iş davam edir.
- **Bekenstein və Hawking-i alt-üst etmir.** Onların təsvirini ilkin, yalnız tarazlıq qanununun heç nə deyə bilmədiyi dinamik rejimə *genişləndirir*.

Sübut nə qədər güclüdür?

Öz mahiyyəti etibarilə güclü nəticədir: sahənin aparıcı qruplarından birinin hazırladığı, diqqətli və daxili baxımdan ardıcıl riyazi fizika işi Physical Review Letters-da *Editors' Suggestion* kimi dərc olunub. Resenziyalı yanaşı məqalə daha uzun çıxarışları təqdim edir və Letter-də ixtisar olunmuş halları araşdırır.

Dürüst qeydlər keyfiyyətə yox, növə aiddir:

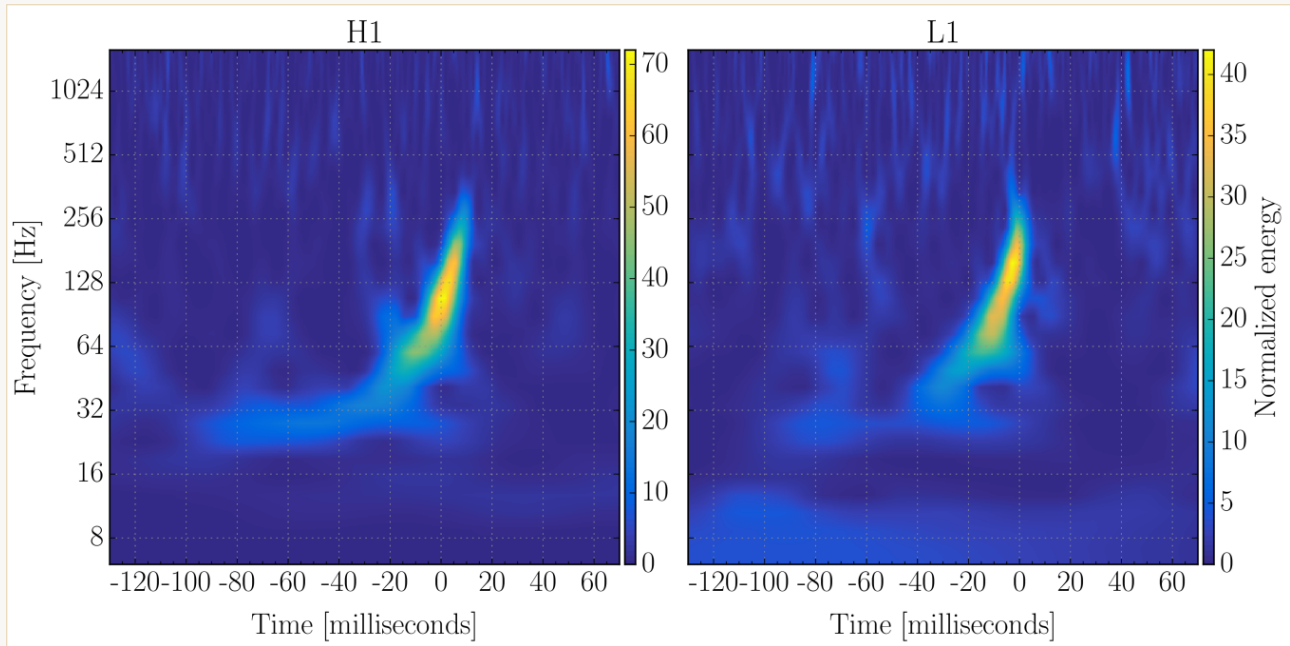
- Üfüq sahəsinin *entropiya olması* barədə standart fərziyyəyə söykənir (sahə bölünsün Nyuton sabiti və Plank sabitinin dörd mislinə). Tam kvant qravitasiyası nəzəriyyəsi bu eyniləşdirməni nə vaxtsa dəyişsə, şərh də onunla dəyişər.
- Qısalıq və sadəlik naminə, qısa Letter əsas çıxarışı ox-simmetrik, fəzayabənzər dinamik üfüqlərdən istifadə etməklə təqdim edir. Resenziyalı yanaşı məqalə zamanabənzər dinamik üfüqləri açıq şəkildə təhlil edir və fırlanma Killing sahəsi olmadan bucaq momentini qurur. Lakin buxarlanan zamanabənzər üfüqlər üçün əks-təsinin açıq hesablanması sferik simmetriya ilə məhdudlaşır.
- “Tarazlıqdan uzaqda da entropiya = üfüq sahəsi” yeni birinci və ikinci qanunların təbii etdiyi güclü *eyniləşdirmədir* — mikroskopik statistikadan sübut olunmuş teorem deyil.

Yəni: əlli illik çərçivənin ciddi genişləndirilməsi, eksperimental kəşf yox və sınaq gözləyən yeni təbiət qanunu yox.

Niyə önəmlidir?

İki səbəb var, biri praktik, biri konseptual.

Praktik olaraq, indi həqiqətən öyrəndiyimiz qara dəliklər — LIGO və Virgo-nun birləşərkən “eşitdiyi” qara dəliklər — ən mühüm anlarını tarazlıqdan uzaqda keçirirlər. Simulyasiyalar kvazi-lokal üföqü ilkin qara dəliklərdən birləşmə vasitəsilə qalıq obyektə qədər izləyir. Bu məqalədəki kəmiyyətlər həmin üföqün dinamik üföq segmenti sayılan hissələrinə tətbiq olunur və bununla yalnız hər şey sakitləşəndən sonra deyil, birləşmə təkamülünün əksər mərhələlərində və çökmə zamanı qara dəliyin entropiyası və temperaturu haqqında prinsipial şəkildə danışmağa imkan verir. Qovuşmanın düz ətrafındakı qısa müddətdə kvazi-lokal üföq izlənməyə davam edir, lakin indiki termodinamik təsvirdən kənarda qalır.



GW150914, birbaşa aşkarlanmış ilk qravitasiya-dalğası siqnalı, iki qara dəliyin birləşməsindən gəldi. Bu zaman-tezlik xəritələri siqnalı LIGO Hanford (solda) və LIGO Livingston-da (sağda) göstərir: hər iki detektorda parlaq iz siqnal tezliyi birləşməyə doğru artıqca yuxarı süpürülür. Bu, tarazlıqdan uzaq qara-dəlik sisteminin real nümunəsidir; yeni termodinamik çərçivə üçün kontekstdir, onun müşahidə sübutu deyil.

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

Konseptual olaraq qara dəliklərin termodinamik davranışı kvant qravitasiyası barədə malik olduğumuz azsaylı konkret işarələrdən biridir — qravitasiya, kvant nəzəriyyəsi və termodinamikanın görünən şəkildə görüşdüyü yerdir. Şiddətlə dəyişən qara dəlik üçün “entropiya” və “temperatur”un dəqiq nə demək olduğunu kəskinləşdirmək gələcək hər kvant nəzəriyyəsinin vurmali olduğu hədəfi dəqiqləşdirir. Bu, qara dəlik entropiyasının əslində nə olduğu barədə dərin suala cavab vermir. Sualı daha dəqiq ifadə edir — fizikanın bu küncündə işin böyük hissəsi də elə budur.

Təmiz xülasə

Qara dəliklər termodinamikanı xatırladan qanunlara tabe olur, lakin 1973-cü ilin səliqəli “birinci qanunu” yalnız tarazlıqda hərəkətsiz qalan qara dəlikləri müqayisə edir və real prosesi təsvir edə bilmirdi. Ashtekar, Paraizo və Shu kvazi-lokal üfüqlərdən istifadə edərək, termodinamik qanunları onların dinamik üfüq segmentlərinə tətbiq edərək və həmin segmentlər boyunca hər bir vəziyyətə ani temperatur və spin təyin edən xəritə quraraq həm birinci, həm də ikinci qanunu tarazlıqdan istənilən qədər uzaq — qidalanan, çökən, sönməklənən və birləşmənin əksər mərhələlərindən keçən — qara dəliklərə genişləndirirlər. Nəticə budur ki, dinamik üfüq segmenti ilə təmsil olunan hər mərhələdə üfüq sahəsi entropiyanın düzgün ölçüsü olaraq qalır. Simulyasiyalar kvazi-lokal üfüqü izləməyə davam etsə də, qovuşmaya çox yaxın qısa müddət həmin termodinamik təsvirə hələ daxil deyil. Əsas çərçivə ümumi nisbilikdədir və buxarlanmaya yarımklassik tətbiqi var; bu, kvant qravitasiyası, müşahidə, mikrovəziyyətlərin hesablanması və ya informasiya paradoksunun həlli deyil.

No-BS yoxlaması

Məqalə nə göstərir: Birinci və ikinci qara-dəlik mexanikası qanunlarının tam dinamik, tarazlıqdan uzaq qara dəliklərə kvazi-lokal üfüqlər və onların dinamik üfüq segmentləri üçün şərtləri ödəyən hissələri əsasında qurulmuş riyazi uyğun genişləndirilməsini. Məqalə sonlu, proses əsaslı birinci qanunu və kəmiyyət ikinci qanunu müəyyən edir və dinamik qara dəliyin entropiyasını üfüq sahəsi ilə eyniləşdirməyi təbii edir.

Gerçək, amma şərhə əsaslanan hissə: Tarazlıqdan uzaqda “entropiya = üfüq sahəsi” eyniləşdirilməsi. Yeni qanunlar onu güclü edir, amma mikroskopik səviyyədə çıxarmaq əvəzinə standart klassik sahə-entropiya fərziyyəsini miras alır.

Nəyi göstərmir: Kvant qravitasiyası nəzəriyyəsini; qara dəlik entropiyasının mikroskopik mənşəyini və ya “sayını”; informasiya paradoksunun həllini; hər hansı müşahidə və eksperimental nəticəni; fiziki olaraq ölçə biləcəyiniz temperaturu.

Əsas məhdudiyyətlər: Əsas çıxarış ümumi nisbilikdədir, zamanabənzər buxarlanma tətbiqi isə yarımklassik yaxınlaşmadan istifadə edir; ikili qovuşmaya çox yaxın qısa müddət dinamik üfüq segmenti ilə təmsil olunmur və onun termodinamik təsviri üzərində iş davam edir, baxmayaraq ki, ədədi simulyasiyalar kvazi-lokal üfüqü izləməyə davam edir; buxarlanan zamanabənzər üfüqlərin əks-təsirinin açıq hesablanması sferik simmetriya ilə məhdudlaşır; sahə-entropiya eyniləşdirilməsi statistik mexanikadan sübut edilmir, qəbul olunur.

Ümumi oxucu nə qədər əmin olmalıdır? Bunun qara-dəlik termodinamikasını həqiqətən dinamik rejimə genişləndirən möhkəm və hörmətli nəzəri irəliləyiş olduğuna yüksək inam. Eyni dərəcədə yüksək inam ki, bu yeni müşahidə iddiası deyil, kvant qravitasiyası deyil və məşhur informasiya tapmacasının həlli deyil. Düzgün mövqe: teleskopla yox, təbaşirlə atılmış real anlayış addımı.

Nəşrdən sonra yeniləmələr**• Düzəliş · 2026-08-27**

Məsul müəllif Abhay Ashtekarın rəyindən sonra zamanabənzər və ox-simmetrik olmayan halları resenziyalı yanaşı məqalədə açıq şəkildə təhlil edilmiş deyil, yalnız əsaslandırılmış kimi təqdim edən iki ifadəni düzəlttik. İcmal zamanı həmçinin aydınlaşdırdıq ki, kvazi-lokal üfüq dinamik üfüq segmenti üçün tələb olunan şərtləri ödəmədiyi ikili qovuşmaya çox yaxın qısa müddəti çərçivə hələ əhatə etmir.

• Düzəliş · 2026-08-28

Müəlliflə yazışmalara cavabdeh Abhay Ashtekarın əlavə izahından sonra ədədi simulyasiyaların ilkin qara dəliklərdən birləşmə vasitəsilə qalığ obyektdə qədər izlədiyi kvazi-lokal üfüqləri termodinamik qanunların tətbiq olunduğu dinamik üfüq segmentləri üçün əlavə şərtləri ödəyən hissələrdən fərqləndirdik.

Mənbələr

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

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

Ashtekar, Paraizo & Shu, Thermodynamics of dynamical black holes beyond perturbation theory, Gen. Relativ. Gravit. 58, 91 (2026)

<https://doi.org/10.1007/s10714-026-03585-4>