



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 termodinamikaya bənzəyən qanunlara əməl etdiyi məlumdur, amma ən təmiz versiya yalnız sakit, tarazlıqda olan qara dəliklərə aid idi. Yeni Physical Review Letters məqaləsi yerli müəyyən edilən “dinamik üfüqlərdən” istifadə edərək birinci və ikinci qanunları sürətlə dəyişən — maddə udan, birləşən, şüalanan — qara dəliklərə genişləndirir. Bu, hətta şiddətlə təkamül edən qara dəliyə temperatur və entropiya təyin etməyə imkan verir. Bu, klassik ümumi nisbilikdə riyazi nəticədir; yeni kvant qravitasiyası, müşahidə və ya qara-dəlik informasiya paradoksunun 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 birləşməsinə, şiddətli doğuşdan sonra sönməyə 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 üfüyünün *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 üfüyünün 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 üfüyünü 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 üfüyünün hissəsi olmazdı. Dərs gələcəyin keçmişi dəyişdirməsi deyil; hadisə üfüyünün 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 üfüyünü qara dəliyin “vəziyyəti”nin davamlı hesabı üçün yararsız edir. 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 nəticəni başqa üfük anlayışı üzərində qurur — sonsuz gələcəyə istinad etmədən yalnız öz yaxınlığındakı həndəsə ilə müəyyən olunan **kvazi-lokal** üfük. Bu “dinamik üfük seqmentləri” ədədi nisbilik mütəxəssislərinin birləşmə simulyasiyalarında qara dəlikləri tapmaq üçün artıq istifadə etdiyi səthlərdir; məhz yerli və düzüst olduqları üçün: sahələri yalnız enerji həqiqətən onların içindən keçəndə böyüyür.

Bunun üzərinə müəlliflər problemin daha çətin yarısını həll edirlər. Adi termodinamikada tarazlıqdan uzaq sistem sürüşkəndir: ona tək temperatur və ya təzyiq təyin etmək təmiz şəkildə mümkün deyil, çünki bu kəmiyyətlər yalnız sistem sabitləşəndə aydın müəyyən olunur. Qara dəliklərdə də eyni problem var — müəlliflərin göstərdiyinə görə, ümumi nisbiləyin xüsusi xüsusiyyətindən istifadə edəndə. Tarazlıqda olan qara dəlik (Kerr qara dəliyi) yalnız iki rəqəmlə müəyyən olunur: ölçüsü və spini. Müəlliflər buna görə cılız şəkildə dəyişən, tarazlıqdan uzaq istənilən üfuku götürüb hər anda ona ən çox bənzəyən tarazlıq qara dəliyinin iki rəqəmini oxuyan xəritə qururlar. Bu xəritə vasitəsilə şiddətlə dəyişən qara dəliyə belə **zamandan asılı temperatur və spin** təyin etmək mümkün olur.

Bu hissələrlə — üfüqdən keçən yerli müəyyən edilmiş enerji və ani intensiv kəmiyyətlərlə — onlar birinci qanunu tarazlıqdan istənilən qədər uzaq qara dəliklərə genişləndirirlər. Əsas odur ki, yeni qanun iki donmuş vəziyyət arasındakı sonsuz kiçik addımları yox, **real fiziki proseslərin yaratdığı sonlu dəyişiklikləri** (maddə və qravitasiya dalğalarının üfüqdən keçməsinə) təsvir edir. Onu uyğun ikinci qanunla cütləşdirirlər və bu ikinci qanun artıq *kəmiyyət* deyir: üfük sahəsi içəri axan enerjiyə birbaşa bağlı qədər artır. Birinci və ikinci qanun birlikdə təmiz nəticəyə işarə edir — təsəvvür edilə biləcək ən şiddətli hadisənin ortasındakı qara dəlik üçün belə entropiyanın doğru ölçüsü yenə üfük sahəsidir.

Bu nəyi sübut etmir?

- **Kvant qravitasiyasını həll etmir.** Bu, üfük sahəsinin entropiya ilə standart eyniləşdirilməsindən istifadə edən *klassik* ümumi nisbilik nəticəsidir. Həmin entropiyanı daha fundamental bir şeydən çıxarmır.
- **Mikrovəziyyətləri saymır və qara dəlik entropiyasının nədən yarandığını izah etmir.** Qara-dəlik termodinamikasının hesabını genişləndirir; qutunu açıb mikroskopik sərbəstlik dərəcələrini göstərmir.
- **Qara-dəlik informasiya paradoksunu həll etmir.** Bu tapmaca kvant nəzəriyyəsində yaşayır; məqalə ona toxunmur.
- **Müşahidə və ya ölçmə deyil.** Heç bir teleskop, məlumat və qravitasiya-dalğası signalı iştirak etmir — bu, riyaziyyatdır. Buradakı birləşən qara dəliyin “temperaturu” termometrlə oxuya biləcəyiniz şey yox, tənliklərdə dəqiq müəyyən edilmiş kəmiyyətdir.
- **Bekenstein və Hawking-i alt-üst etmir.** Onların təsvirini ilkin, yalnız tarazlıq qanununun heç nə deyə bilmədiyi dinamik rejimə *genişləndirir*.

Sübut nə qədər güclüdür?

Nə olduğu üçün güclüdür: sahənin aparıcı qrupundan gələn, Physical Review Letters-da *Editors' Suggestion* kimi dərc olunmuş diqqətli, daxili uyğunluqlu riyazi fizika işi (yanaşı məqalə uzun çıxarışları işləyir).

Dürüst qeydlər keyfiyyətə yox, növə aiddir:

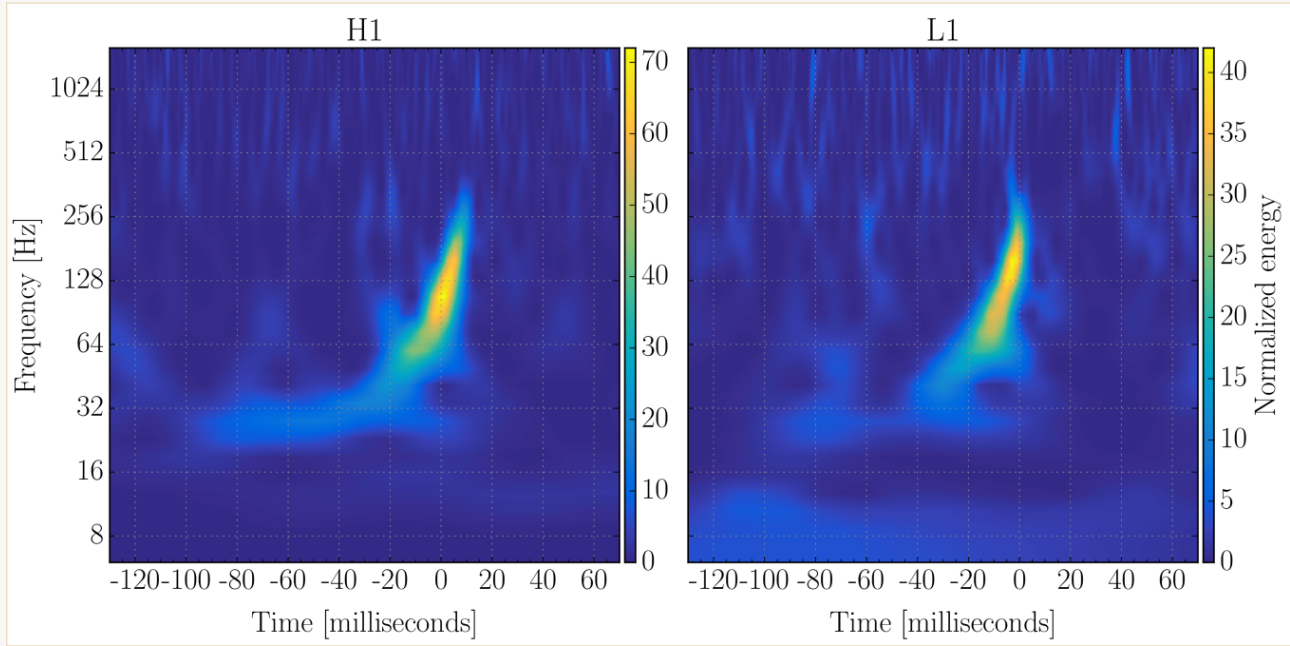
- Üfüq sahəsinin *entropiya olması* barədə standart fərziyyəyə söykənir (sahə bölünsün Nyuton sabiti və Plank sabitinin dörd mislinə). Tam kvant qravitasiyası nəzəriyyəsi bu eyniləşdirməni nə vaxtsa dəyişsə, şərh də onunla dəyişər.
- Əsas hesablamalar ən yaygın hal üçün (fəzayabənzər dinamik üfüqlər, ox-simmetrik) aparılıb; müəlliflər məhdudiyyətlərin əsas olmadığını arqumentləşdirirlər, amma tam ümumi ifadə başqa nəticələrə söykənir.
- “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 bu gün həqiqətən öyrəndiyimiz qara dəliklər — LIGO və Virgo-nun birləşərkən “eşitdiyi” dəliklər — ən vacib anlarını tarazlıqdan uzaqda keçirir. Bu məqalədəki kəmiyyətlər simulyasiyaların artıq izlədiyi eyni yerli müəyyən edilmiş üfüqlərdən qurulur, ona görə qara dəliyin entropiyası və temperaturu haqqında yalnız birləşmədən əvvəl və sonra yox, *birləşmə və ya çökmə zamanı* da prinsipial danışmaq üsulu verir.



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 artdıqca 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 termodinamikaya bənzəyən qanunlara əməl edir, amma səliqəli 1973 “birinci qanunu” yalnız tarazlıqda sakit dayanan qara dəlikləri müqayisə edir və real prosesi təsvir edə bilmirdi. Ashtekar, Paraizo və Shu yerli müəyyən edilmiş “dinamik üfüqlərdən” və dəyişən qara dəliyə ani temperatur və spin təyin edən xəritədən istifadə edərək həm birinci, həm ikinci qanunu tarazlıqdan istənilən qədər uzaq — birləşən, maddə udan, sökülənən — qara dəliklərə genişləndirirlər. Nəticə budur ki, şiddətli hadisələr zamanı da üfüq sahəsi entropiyanın doğru ölçüsü olaraq qalır. Bu, klassik ümumi nisbilikdə ciddi nəticədir; kvant qravitasiyası deyil, müşahidə deyil, mikrovəziyyətlərin sayı deyil və informasiya paradoksunun həlli deyil.

No-BS yoxlaması

Məqalə nə göstərir: Kvazi-lokal dinamik üfüqlər üzərində qurulmuş birinci və ikinci qara-dəlik mexanikası qanunlarının tam dinamik, tarazlıqdan uzaq qara dəliklərə riyazi uyğun genişləndirilməsini. 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: Bütünlüklə klassik ümumi nisbilik; əsas nəticələr yaygın fəza-yabənzər, ox-simmetrik hal üçün sübut olunub və ümumilik yanaşı işlərlə əsaslandırılır; sahə–entropiya eyniləşdirilməsi statistik mexanikadan sübut edilmir, fərz 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 mövqə: teleskopla yox, təbəşirlə atılmış real anlayış addımı.

Mənbələr

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

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