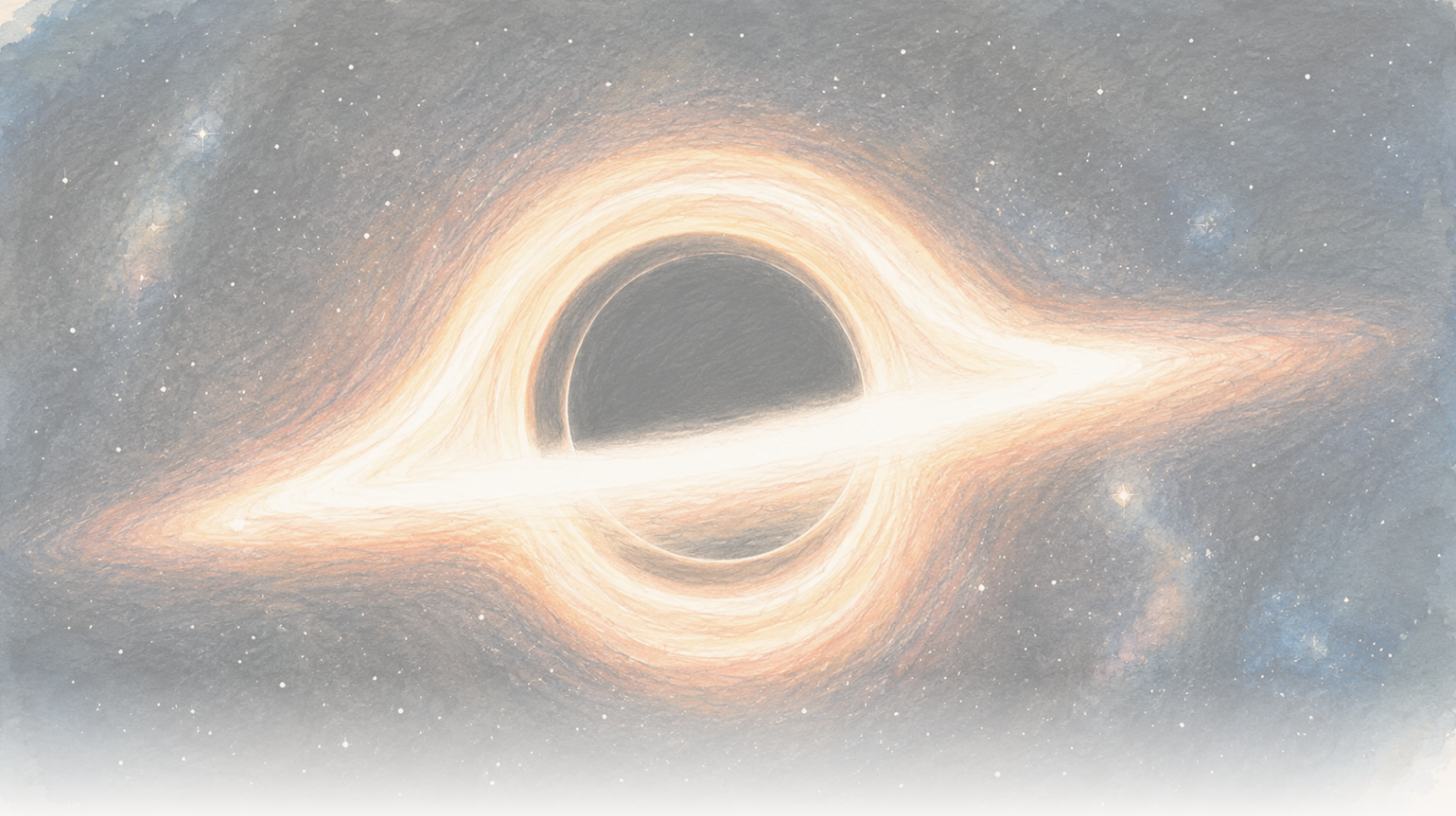




The CLEAN PAPER

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

Crne rupe slijede termodinamičke 'zakone' — novi rezultat proširuje ih na crne rupe daleko od ravnoteže

Od 1970-ih poznato je da crne rupe slijede zakone koji zrcale termodinamiku, ali najčišća verzija vrijedila je samo za crne rupe koje miruju u ravnoteži. Novi rad u Physical Review Letters proširuje prvi i drugi zakon na crne rupe koje se brzo mijenjaju — gutaju tvar, spajaju se ili zrače — koristeći lokalno definirane 'dinamičke horizonte'. Time se i nasilno evoluirajućoj crnoj rupi mogu pridružiti temperatura i entropija. To je matematički rezultat unutar klasične opće relativnosti, a ne nova kvantna gravitacija, opažanje ili rješenje paradoksa informacija crne rupe.

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

Crne rupe imaju „zakone” nalik termodinamici. Uredna verzija radila je samo dok se ništa nije događalo.

Jedna od najčudnijih činjenica u fizici jest da se crne rupe ponašaju poput toplih objekata. Početkom 1970-ih Bekenstein i Hawking primijetili su da se jednadžbe koje opisuju crne rupe, član po član, podudaraju sa zakonima termodinamike: crna rupa ima entropiju razmjernu površini horizonta i temperaturu razmjernu površinskoj gravitaciji. Hawking je potom pokazao da je temperatura stvarna u najdubljem smislu — crna rupa doista vrlo slabo svijetli toplinskim zračenjem.

Što je Hawkingovo zračenje?

Klasično gledano ništa ne može pobjeći iz crne rupe, pa bi ona trebala biti savršeno crna i uopće ne imati temperaturu. Stephen Hawking je 1974. pokazao da se to mijenja kada se u blizini horizonta uključi kvantna teorija: crna rupa emitira slabo toplinsko zračenje i zato polako gubi masu, odnosno „isparava”. Spektar je toplinski na Hawkingovoj temperaturi, dok prolazak kroz zakrivljeni prostor-vrijeme mijenja zračenje koje stiže u beskonačnost. U uobičajenoj heurističkoj slici — koja nije Hawkingov stvarni izvod — kvantne fluktuacije neposredno izvan horizonta stvaraju parove u kojima jedan član pobjegne kao zračenje, a drugi upadne unutra.

Ključno je da je ta temperatura *obrnuto* razmjerna masi crne rupe: što je rupa manja, to je toplija. Za bilo koju crnu rupu koju bi teleskop mogao vidjeti temperatura je nevjerojatno niska — mnogo niža od temperature praznog prostora oko nje — pa je u praksi sjaj posve zanemariv i nikada nije izravno izmjeren. Važnost mu je konceptualna: Hawkingovo zračenje ono je što *analogiju* između mehanike crnih rupa i termodinamike pretvara u stvarnu termodinamiku. Budući da crna rupa doista ima temperaturu, „temperatura” i „entropija” u tim zakonima stvarne su termodinamičke veličine, a ne formalna slučajnost. (Ovo je pozadina sadašnjeg rada, a ne jedan od njegovih rezultata.)

Ta korespondencija počiva na rezultatu zvanom **prvi zakon mehanike crnih rupa** (Bardeen, Carter i Hawking, 1973.). Riječima: ako crnu rupu malo pomaknete iz jednog stacionarnog stanja u obližnje stacionarno stanje, promjena njezine mase jednaka je temperaturi pomnoženoj s promjenom entropije, uz dodatni član za rotaciju. To je verzija tvrdnje „unesena toplina jednaka je temperaturi puta promjena entropije” za crnu rupu.

Kvaka se krije u izrazu *obližnje stacionarno stanje*. Uredni zakon iz 1973. uspoređuje dvije crne rupe koje miruju u ravnoteži i razlikuju se samo beskonačno malo. Zapravo nikada ne opisuje **proces** — crnu rupu koja guta zvijezdu, dvije crne rupe koje se spajaju, novonastalu rupu koja se nakon nasilnog nastanka smiruje. Upravo su to situacije koje najviše želimo razumjeti, a suprotne su od „mirnog sjedenja”. Uredni zakon utihne upravo kada crna rupa postane zanimljiva.

Zašto očiti popravak ne radi

Mogli biste pomisliti da je rješenje lako: jednostavno pratite kako horizont raste dok tvar pada unutra. Problem je *koji* horizont.

Horizont koji većina ljudi zamišlja — **horizont događaja**, prava granica nakon koje nema povratka — ima suptilno i nezgodno svojstvo: definiran je cijelom budućnošću svemira. Da biste znali gdje se horizont događaja nalazi *upravo sada*, morali biste znati sve što će ikada, zauvijek, pasti u crnu rupu. To nije tehnička sitnica. Horizont događaja može početi rasti u potpuno praznom, ravnom području prostora *prije* nego što stigne tvar koja će hraniti crnu rupu, samo zato što je toj tvari suđeno da stigne kasnije. Njegova površina može rasti tamo gdje se lokalno ne događa baš ništa.

Kako horizont može rasti prije nego što tvar stigne?

Znanstveni naziv za ovu neobičnost jest **teleološka priroda horizonta događaja**, odnosno njegova **globalna definicija**. „Teleološki” ovdje ne znači da horizont ima svrhu, predviđa budućnost ili šalje utjecaj unatrag kroz vrijeme. Znači da se pripada li neki događaj unutrašnjosti horizonta može odlučiti tek iz potpune buduće povijesti prostor-vremena.

Formalna definicija kaže isto sažetije. Zamislite **buduću nul-beskonačnost** — nazvanu „I-plus” i zapisanu $\mathcal{I}^+$ — kao odredište do kojeg stiže svjetlost koja zauvijek pobjegne prema beskonačno udaljenoj budućnosti inače praznog prostora. Horizont događaja granica je između događaja iz kojih izlazni svjetlosni signal naposljetku može dosegnuti to odredište i događaja iz kojih nijedan signal nikada ne može. U standardnoj notaciji opće relativnosti to je granica kauzalne prošlosti buduće nul-beskonačnosti: $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$. Budući da je riječ *ikada* ugrađena u samu definiciju, nijedno mjerenje provedeno samo ovdje i sada ne može točno odrediti horizont događaja.

Kolabirajuća kuglasta ljuska čini neobičnost vidljivom. Prije nego što ljuska stigne, područje unutar nje može biti prazno i lokalno ravno. Šaljite izlazne zrake svjetlosti iz središta u sve kasnijim trenucima: ranije zrake pobjegnu, dok kasnije susreću kolabirajuću ljusku u geometriji iz koje ne mogu izaći. Horizont događaja granica je koja odvaja ta dva ishoda. Pratimo li tu granicu unatrag, ona počinje u središtu i širi se kroz još uvijek praznu, ravnu unutrašnjost prije nego što ljuska stigne. Rast njezine površine ne izvještava o lokalnom toku tvari; bilježi koje putanje bijega ostaju otvorene u dovršenom prostor-vremenu.

Ništa u toj slici ne djeluje unatrag u vremenu. Kada bi se ljuska preusmjerila i crna rupa se ne bi stvorila, dovršeno prostor-vrijeme bilo bi drukčije i to ranije područje ne bi bilo dio horizonta događaja. Pouka nije da budućnost mijenja prošlost, nego da je horizont događaja **globalna kauzalna granica**, a ne površina koju obližnji promatrač može otkriti u jednom trenutku. Upravo zato fizičari koriste kvazilokalne ili dinamičke horizonte kada žele pratiti crnu rupu dok se mijenja.

Zbog toga je horizont događaja neupotrebljiv kao tekući opis „stanja” crne rupe. U računalnoj simulaciji ne možete ga čak ni točno locirati dok simulacija ne završi, a svakako ga ne možete koristiti za praćenje temperature ili entropije iz trenutka u trenutak.

Potez: horizont koji se može definirati lokalno

Novi rad Abhaya Ashtekara, Daniela Paraiza i Jonathana Shua gradi rezultat na drukčijem pojmu horizonta — **kvazilokalnom** horizontu, definiranom samo geometrijom u vlastitom susjedstvu, bez pozivanja na beskonačnu budućnost. Ti „segmenti dinamičkog horizonta” površine su koje numerički relativisti već koriste za pronalaženje crnih rupa u simulacijama spajanja upravo zato što su lokalne i poštene: površina im raste samo tamo gdje energija stvarno prolazi kroz njih.

Povrh toga autori rješavaju teži dio problema. U običnoj termodinamici sustav daleko od ravnoteže poznato je teško opisati: ne možete mu uredno pripisati jednu temperaturu ili tlak jer su te veličine dobro definirane tek kada se sustav smiri. Crne rupe imaju isti problem — sve dok, pokazuju autori, ne iskoristite posebno svojstvo opće relativnosti. Crna rupa u ravnoteži (Kerrova crna rupa) određena je samo dvama brojevima: veličinom i vrtnjom. Autori zato grade preslikavanje koje svaki divlje evoluirajući horizont daleko od ravnoteže u svakom trenutku povezuje s dvama brojevima ravnotežne crne rupe na koju trenutačno nalikuje. Preko tog preslikavanja nasilno promjenjivoj crnoj rupi ipak se mogu pridružiti **temperatura i vrtnja ovisne o vremenu**.

S tim sastojcima — lokalno definiranom energijom koja prelazi horizont i trenutačnim intenzivnim veličinama — proširuju prvi zakon na crne rupe proizvoljno daleko od ravnoteže. Ključno je da novi zakon opisuje **konačne promjene izazvane stvarnim fizičkim procesima** (tvar i gravitacijski valovi koji prelaze horizont), a ne beskonačno male korake između dva zamrznuta stanja. Uparuju ga s odgovarajućim drugim zakonom, čiji je iskaz sada *kvantitativan*: površina horizonta raste za iznos izravno povezan s energijom koja je ušla. Zajedno, prvi i drugi zakon upućuju na jedan čist zaključak — čak i za crnu rupu usred najnasilnijeg zamislivog događaja, prava mjera entropije i dalje je površina njezina horizonta.

Što ovo ne dokazuje

- **Ne** rješava kvantnu gravitaciju. Ovo je rezultat u *klasičnoj* općoj relativnosti koji koristi standardno poistovjećivanje površine horizonta s entropijom. Ne izvodi tu entropiju iz nečega temeljnijeg.
- **Ne** broji mikrostanja niti objašnjava od čega je entropija crne rupe sastavljena. Proširuje termodinamički opis crnih rupa; ne otvara kutiju i ne otkriva mikroskopske stupnjeve slobode.
- **Ne** rješava paradoks informacija crne rupe. Taj problem pripada kvantnoj teoriji; ovaj ga rad ne dotiče.
- **Nije** opažanje ni mjerenje. Nema teleskopa, podataka ni signala gravitacijskih valova — ovo je matematika. „Temperatura” crne rupe koja se spaja ovdje je precizno definirana veličina u jednadžbama, a ne nešto što biste mogli očitati termometrom.
- **Ne** ruši Bekensteina i Hawkinga. Njihovu sliku *proširuje* na dinamički režim u kojem izvorni zakon, ograničen na ravnotežu, nije imao što reći.

Koliko su jaki dokazi?

Jaki, za ono što jesu: pažljiv, interno konzistentan rad iz matematičke fizike vodeće skupine u području, objavljen kao *Editors' Suggestion* u časopisu *Physical Review Letters* (prateći rad donosi dulje izvode).

Poštene ograde odnose se na *vrstu*, a ne kvalitetu:

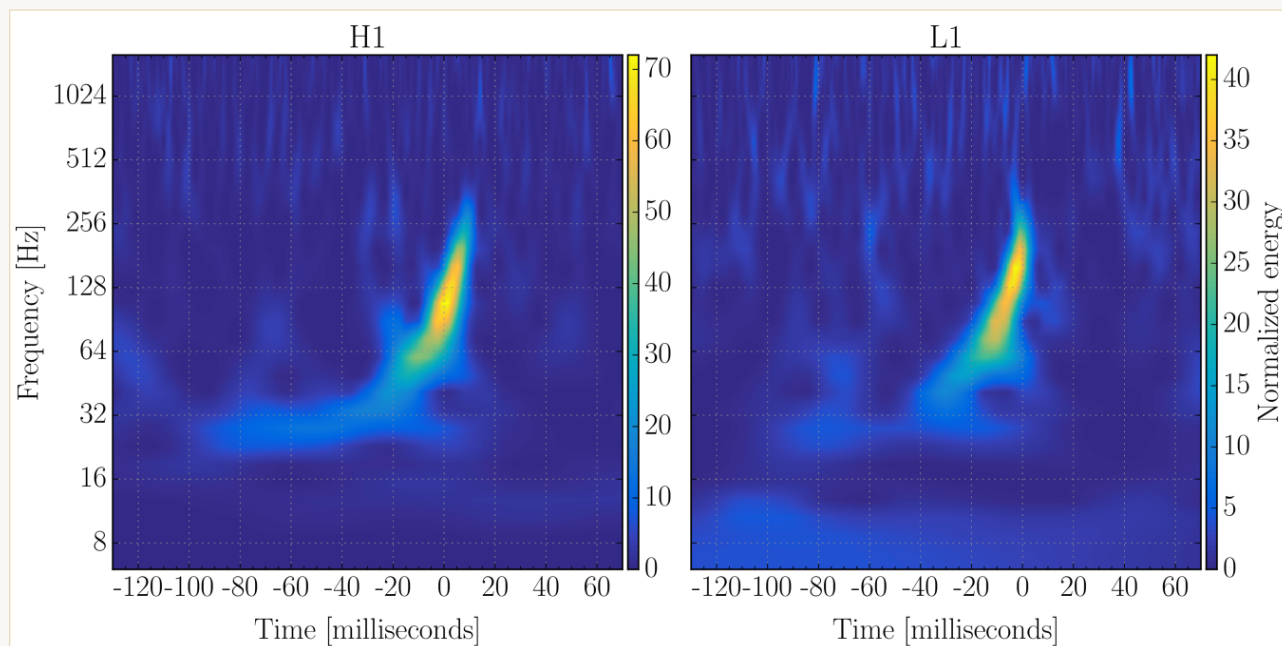
- Rad počiva na uobičajenoj pretpostavci da površina horizonta *jest* entropija (površina podijeljena s četiri puta Newtonovom konstantom i Planckovom konstantom). Kada bi puna kvantna teorija gravitacije jednog dana promijenila tu identifikaciju, promijenilo bi se i tumačenje.
- Glavni izračuni izvedeni su za najčešći slučaj (prostornolike dinamičke horizonte, aksijalno simetrične); autori tvrde da ograničenja nisu bitna, ali potpuno općenit iskaz oslanja se i na rezultate drugdje.
- „Entropija je jednaka površini horizonta, čak i izvan ravnoteže” uvjerljiva je *identifikacija* koju novi prvi i drugi zakon čine prirodnom — nije teorem izveden iz mikroskopske statistike.

Dakle: rigorozno proširenje pedeset godina starog okvira, a ne eksperimentalno otkriće ni novi zakon prirode koji tek čeka testiranje.

Zašto je važno

Dva su razloga, jedan praktičan i jedan konceptualan.

Praktično, crne rupe koje danas doista proučavamo — one čija spajanja LIGO i Virgo „čuju” — provode najvažnije trenutke daleko od ravnoteže. Veličine u ovom radu izgrađene su iz istih lokalno definiranih horizonata koje simulacije već prate, pa rad daje principijelan način da govorimo o entropiji i temperaturi crne rupe *tijekom* spajanja ili kolapsa, a ne samo prije i poslije.



GW150914, prvi izravno detektirani signal gravitacijskih valova, potekao je od spajanja dviju crnih rupa. Ove vremensko-frekvencijske karte prikazuju signal u LIGO Hanfordu (lijevo) i LIGO Livingstonu (desno): u oba detektora svijetli trag ide prema gore kako frekvencija signala raste prema spajanju. To je stvarni primjer sustava crnih rupa daleko od ravnoteže; služi kao kontekst za novi termodinamički okvir, a ne kao opažački dokaz tog okvira.

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

Konceptualno, termodinamičko ponašanje crnih rupa jedan je od rijetkih konkretnih tragova koje imamo prema kvantnoj gravitaciji — mjesto na kojem se gravitacija, kvantna teorija i termodinamika vidljivo susreću. Preciznije određivanje što „entropija” i „temperatura” znače za crnu rupu koja se nasilno mijenja sužava metu koju će buduća kvantna teorija morati pogoditi. Ne odgovara na duboko pitanje što entropija crne rupe zapravo jest. Preciznije postavlja pitanje — a u ovom kutu fizike to je velik dio posla.

Sažetak bez uljepšavanja

Crne rupe slijede zakone koji zrcale termodinamiku, ali uredni „prvi zakon” iz 1973. uspoređivao je samo crne rupe koje miruju u ravnoteži i nije mogao opisati stvarni proces. Ashtekar, Paraizo i Shu proširuju prvi i drugi zakon na crne rupe proizvoljno daleko od ravnoteže — tijekom spajanja, hranjenja ili smirivanja — koristeći lokalno definirane „dinamičke horizonte” i preslikavanje koje promjenjivoj crnoj rupi pridružuje trenutačnu temperaturu i vrtnju. Zaključak je da površina horizonta ostaje prava mjera entropije čak i tijekom nasilnih događaja. To je rigorozan rezultat u klasičnoj općoj relativnosti, a ne kvantna gravitacija, opažanje, brojanje mikrostanja ili rješenje paradoksa informacija.

Provjera bez okolišanja

Što rad pokazuje: Matematički konzistentno proširenje prvog i drugog zakona mehanike crnih rupa na potpuno dinamičke crne rupe daleko od ravnoteže, izgrađeno na kvazilokalnim dinamičkim horizontima. Definira konačni prvi zakon zasnovan na procesu i kvantitativni drugi zakon te čini prirodnim poistovjećivanje entropije dinamičke crne rupe s površinom horizonta.

Što je stvarno, ali interpretativno: Identifikacija „entropija = površina horizonta” izvan ravnoteže. Novi je zakoni čine uvjerljivom, ali ona nasljeđuje standardnu klasičnu pretpostavku površina-entropija umjesto da je izvodi.

Što rad ne pokazuje: Kvantnu teoriju gravitacije; mikroskopsko podrijetlo ili „broj” entropije crne rupe; rješenje paradoksa informacija; bilo kakav opažački ili eksperimentalni rezultat; temperaturu koju biste fizički mogli izmjeriti.

Glavna ograničenja: Klasična opća relativnost u cijelom radu; glavni rezultati dokazani za čest prostornoliki, aksijalno simetrični slučaj uz općenitost argumentiranu pratećim radom; identifikacija površine i entropije pretpostavljena je, a ne dokazana statističkom mehanikom.

Koliko povjerenja treba imati opći čitatelj? Visoko povjerenje da je ovo solidan, dobro prihvaćen teorijski napredak koji doista proširuje termodinamiku crnih rupa u dinamički režim. Jednako visoko povjerenje da *nije* riječ o novim opažanjima, kvantnoj gravitaciji ni rješenju slavnog paradoksa informacija. Ispravan stav: stvaran korak u razumijevanju, napravljen kredom, a ne teleskopom.

Izvori

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

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