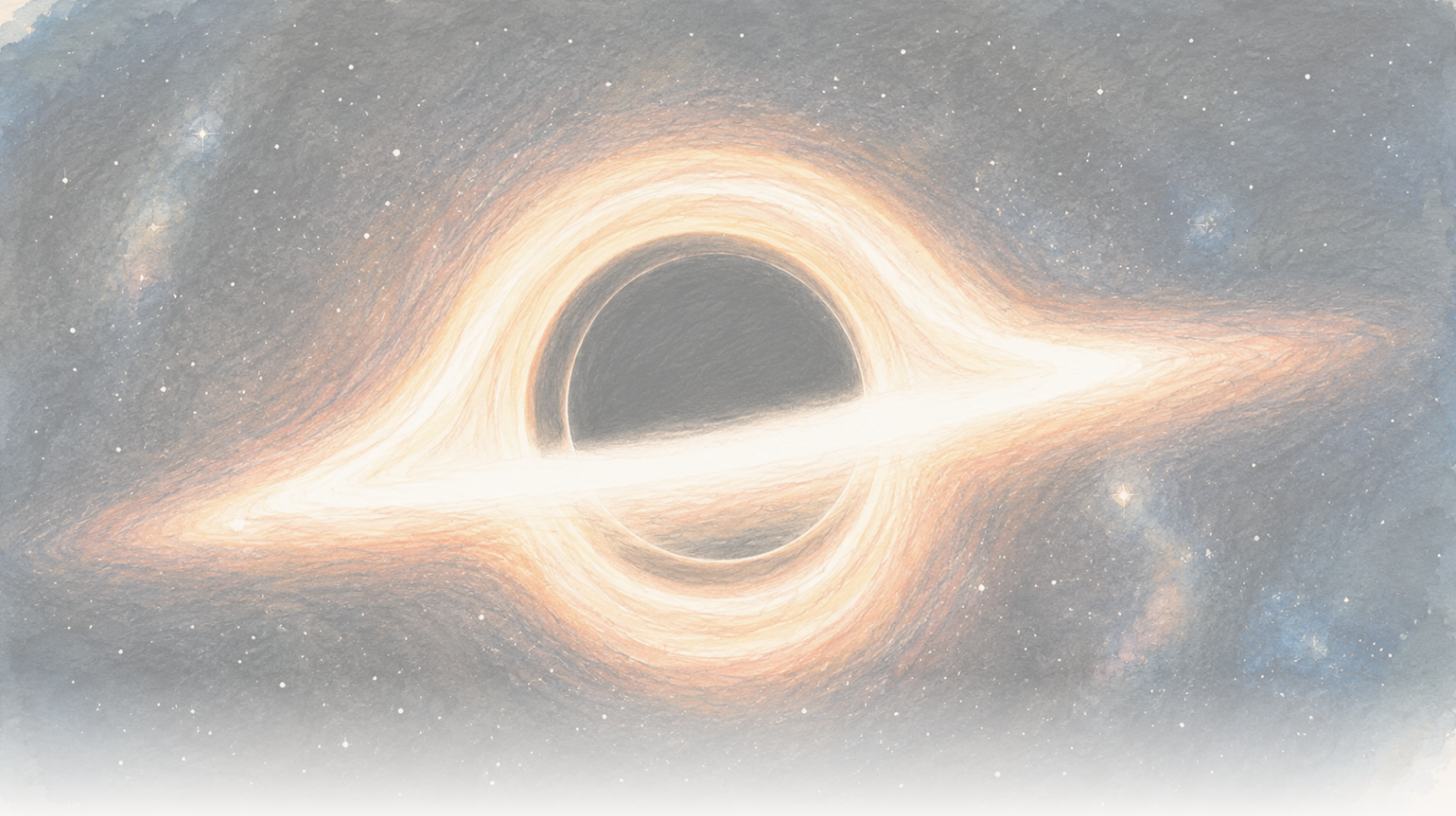




The CLEAN PAPER

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

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

Od 1970-ih poznato je da crne rupe slede zakone koji odražavaju termodinamiku, ali najčišća verzija važila 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 menjaju — gutaju materiju, spajaju se ili zrače — koristeći lokalno definisane 'dinamičke horizonte'. Time se i nasilno evoluirajućoj crnoj rupi mogu pridružiti temperatura i entropija. To je matematički rezultat unutar klasične opšte relativnosti, a ne nova kvantna gravitacija, opažanje ili rešenje 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 je da se crne rupe ponašaju poput toplih objekata. Početkom 1970-ih Bekenstein i Hawking primetili su da se jednačine koje opisuju crne rupe, član po član, podudaraju sa zakonima termodinamike: crna rupa ima entropiju srazmernu površini horizonta i temperaturu srazmernu površinskoj gravitaciji. Hawking je potom pokazao da je temperatura stvarna u najdubljem smislu — crna rupa zaista vrlo slabo svetli toplotnim zračenjem.

What je Hawkingovo zračenje?

Klasično gledano ništa ne može pobeći iz crne rupe, pa bi ona trebala biti savršeno crna i uopšte ne imati temperaturu. Stephen Hawking je 1974. pokazao da se to menja kada se u blizini horizonta uključi kvantna teorija: crna rupa emitira slabo toplotno zračenje i zato polako gubi masu, odnosno „isparava”. Spektar je toplotni na Hawkingovoj temperaturi, dok prolazak kroz zakrivljeni prostor-vreme menja 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 pobegne kao zračenje, a drugi upadne unutra.

Ključno je da je ta temperatura *obrnuto* srazmerna masi crne rupe: što je rupa manja, to je toplija. Za bilo koju crnu rupu koju bi teleskop mogao videti temperatura je neverovatno niska — mnogo niža od temperature praznog prostora oko nje — pa je u praksi sjaj posve zanemariv i nikada nije direktno izmeren. Važnost mu je konceptualna: Hawkingovo zračenje ono je što *analogiju* između mehanike crnih rupa i termodinamike pretvara u stvarnu termodinamiku. Budući da crna rupa zaista 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.). Rečima: ako crnu rupu malo pomaknete iz jednog stacionarnog stanja u obližnje stacionarno stanje, promena njene mase jednaka je temperaturi pomnoženoj s promenom entropije, uz dodatni član za rotaciju. To je verzija tvrdnje „unesena toplota jednaka je temperaturi puta promena entropije” za crnu rupu.

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

Zašto očititi popravak ne radi

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

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

How horizon može rasti pre nego što supstanca stigne?

Naučni naziv za ovu neobičnost je **teleološka priroda horizonta događaja**, odnosno njegova **globalna definicija**. „Teleološki” ovde ne znači da horizont ima svrhu, predviđa budućnost ili šalje uticaj unazad kroz vreme. Znači da se pripada li neki događaj unutrašnjosti horizonta može odlučiti tek iz potpune buduće istorije prostor-vremena.

Formalna definicija kaže isto sažetije. Zamislite **buduću nul-beskonačnost** — nazvanu „I-plus” i zapisanu $\mathcal{I}^+$ — kao odredište do kojeg stiže svetlost koja zauvek pobegne prema beskonačno udaljenoj budućnosti inače praznog prostora. Horizont događaja granica je između događaja iz kojih izlazni svetlosni signal na kraju može dostići to odredište i događaja iz kojih nijedan signal nikada ne može. U standardnoj notaciji opšte relativnosti to je granica kauzalne prošlosti buduće nul-beskonačnosti: $\partial\mathcal{J}^-(\mathcal{I}^+)$. Budući da je reč *ikada* ugrađena u samu definiciju, nijedno merenje provedeno samo ovde i sada ne može tačno odrediti horizont događaja.

Kolabirajuća kuglasta ljuska čini neobičnost vidljivom. Pre nego što ljuska stigne, područje unutar nje može biti prazno i lokalno ravno. Šaljite izlazni zraci svetlosti iz centra u sve kasnijim trenucima: ranije zraci pobegnu, 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 unazad, ona počinje u centru i širi se kroz još uvek praznu, ravnu unutrašnjost pre nego što ljuska stigne. Rast njene površine ne izveštava o lokalnom toku supstance; beleži koje putanje bekstva ostaju otvorene u dovršenom prostor-vremenu.

Ništa u toj slici ne deluje unazad u vremenu. Kada bi se ljuska preusmerila i crna rupa se ne bi stvorila, završeno prostor-vreme bilo bi drugačije i to ranije područje ne bi bilo deo horizonta događaja. Pouka nije da budućnost menja prošlost, nego da je horizont događaja **globalna kauzalna granica**, a ne površina koju obližnji posmatrač može otkriti u jednom trenutku. Upravo zato fizičari koriste kvazilokalne ili dinamičke horizonte kada žele pratiti crnu rupu dok se menja.

Zbog toga je horizont događaja neupotrebljiv kao trenutni opis „stanja” crne rupe. U računarskoj simulaciji ne možete ga čak ni tačno 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 definisati lokalno

Novi rad Abhaya Ashtekara, Daniela Paraiza i Jonathana Shua gradi rezultat na drugačijem pojmu horizonta — **kvazilokalnom** horizontu, definisanom samo geometrijom u sopstvenom susedstvu, 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 gde energija stvarno prolazi kroz njih.

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

S tim sastojcima — lokalno definisanom energijom koja prelazi horizont i trenutnim intenzivnim veličinama — proširuju prvi zakon na crne rupe proizvoljno daleko od ravnoteže. Ključno je da novi zakon opisuje **konačne promene izazvane stvarnim fizičkim procesima** (supstanca 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 direktno 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 mera entropije i dalje je površina njena horizonta.

Šta ovo ne dokazuje

- **Ne** rešava kvantnu gravitaciju. Ovo je rezultat u *klasičnoj* opštoj relativnosti koji koristi standardno poistovećivanje površine horizonta s entropijom. Ne izvodi tu entropiju iz nečega osnovnijeg.
- **Ne** broji mikrostanja niti objašnjava od čega je entropija crne rupe sastavljena. Proširuje knjigovodstvo termodinamike crnih rupa; ne otvara kutiju i ne otkriva mikroskopske stepene slobode.
- **Ne** rešava paradoks informacija crne rupe. Taj problem pripada kvantnoj teoriji; ovaj ga rad ne dotiče.
- **Nije** opažanje ni merenje. Nema teleskopa, podataka ni signala gravitacionih valova — ovo je matematika. „Temperatura” crne rupe koja se spaja ovde je precizno definisana veličina u jednačinama, 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 grupe u području, objavljen kao *Editors' Suggestion* u časopisu *Physical Review Letters* (prateći rad donosi duže izvode).

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

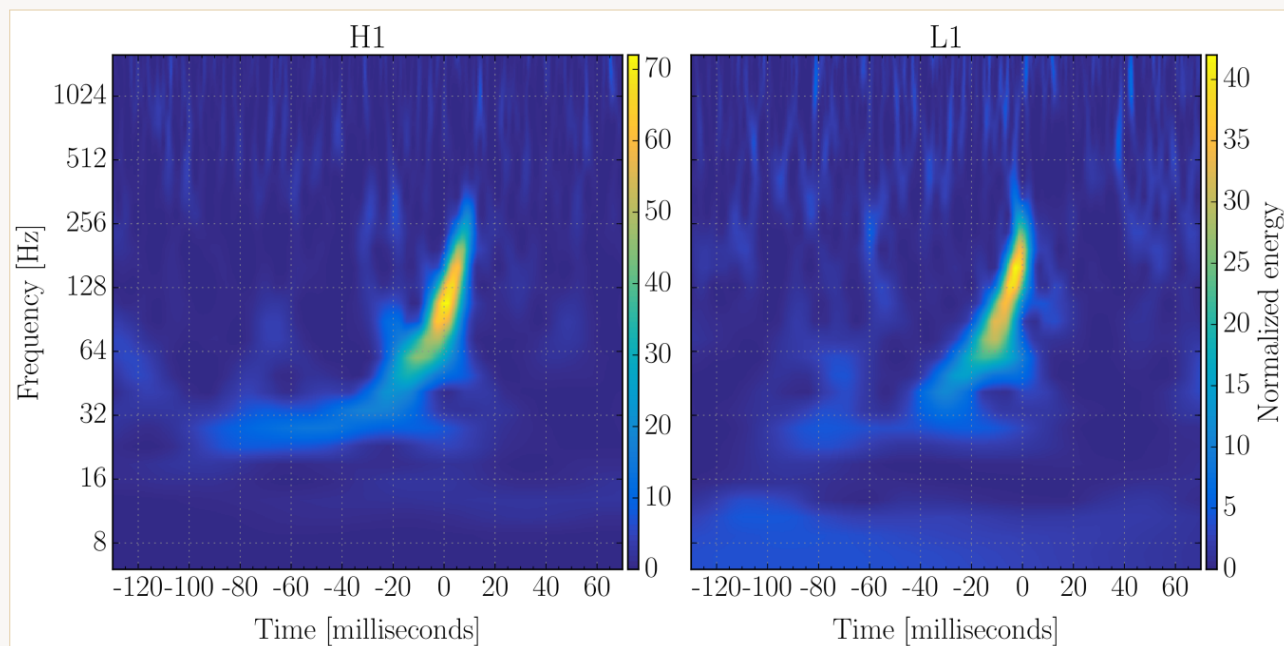
- Rad počiva na uobičajenoj pretpostavci da površina horizonta *je* entropija (površina podeljena s četiri puta Newtonovom konstantom i Planckovom konstantom). Kada bi puna kvantna teorija gravitacije jednog dana promenila tu identifikaciju, promenilo bi se i tumačenje.
- Glavni izračuni izvedeni su za najčešći slučaj (prostornolike dinamičke horizonte, aksijalno simetrične); autori tvrde da ograničenja nisu bitna, ali potpuno opšti iskaz oslanja se i na rezultate drugde.
- „Entropija je jednaka površini horizonta, čak i izvan ravnoteže” ubedljiva je *identifikacija* koju novi prvi i drugi zakon čine prirodnim — 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 zaista proučavamo — one čija spajanja LIGO i Virgo „čuju” — provode najvažnije trenutke daleko od ravnoteže. Veličine u ovom radu izgrađene su iz istih lokalno definisanih horizonata koje simulacije već prate, pa rad daje principijelan način da govorimo o entropiji i temperaturi crne rupe *tokom* spajanja ili kolapsa, a ne samo pre i posle.



GW150914, prvi direktno detektirani signal gravitacionih valova, potekao je od spajanja dveju crnih rupa. Ove vremensko-frekvencijske karte prikazuju signal u LIGO Hanfordu (levo) i LIGO Livingstonu (desno): u oba detektora svetli trag ide prema gore kako frekvencija signala raste prema spajanju. To je stvarni primer sistema crnih rupa daleko od ravnoteže; služi kao kontekst za novi termodinamički okvir, a ne kao posmatrački 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 retkih konkretnih tragova koje imamo prema kvantnoj gravitaciji — mesto na kojem se gravitacija, kvantna teorija i termodinamika vidljivo susreću. Preciznije određivanje što „entropija” i „temperatura” znače za crnu rupu koja se nasilno menja sužava metu koju će buduća kvantna teorija morati pogoditi. Ne odgovara na duboko pitanje šta je entropija crne rupe zapravo. Preciznije postavlja pitanje — a u ovom uglu fizike to je velik deo posla.

Kratak rezime

Crne rupe slede zakone koji odražavaju termodinamiku, ali uredni „prvi zakon” iz 1973. upoređivao 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 — tokom spajanja, hranjenja ili smirivanja — koristeći lokalno definisane „dinamičke horizonte” i preslikavanje koje promenljivoj crnoj rupi pridružuje trenutnu temperaturu i vrtnju. Zaključak je da površina horizonta ostaje prava mera entropije čak i tokom nasilnih događaja. To je rigorozan rezultat u klasičnoj opštoj relativnosti, a ne kvantna gravitacija, opažanje, brojanje mikrostanja ili rešenje paradoksa informacija.

Provera bez ulepšavanja

Šta 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. Definiše konačni prvi zakon zasnovan na procesu i kvantitativni drugi zakon te čini prirodnim poistovećivanje entropije dinamičke crne rupe s površinom horizonta.

Šta je stvarno, ali interpretativno: Identifikacija „entropija = površina horizonta” izvan ravnoteže. Novi je zakoni čine ubedljivom, ali ona nasleđuje standardnu klasičnu pretpostavku površina-entropija umesto da je izvodi.

Šta rad ne pokazuje: Kvantnu teoriju gravitacije; mikroskopsko poreklo ili „broj” entropije crne rupe; rešenje paradoksa informacija; bilo kakav posmatrački ili eksperimentalni rezultat; temperaturu koju biste fizički mogli izmeriti.

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

Koliko poverenja treba da ima prosečan čitalac? Visoko poverenje da je ovo solidan, dobro prihvaćen teorijski napredak koji zaista proširuje termodinamiku crnih rupa u dinamički režim. Jednako visoko poverenje da *nije* reč o novim opažanjima, kvantnoj gravitaciji ni rešenju slavnog paradoksa informacija. Ispravan stav: stvaran korak u razumevanju, 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>