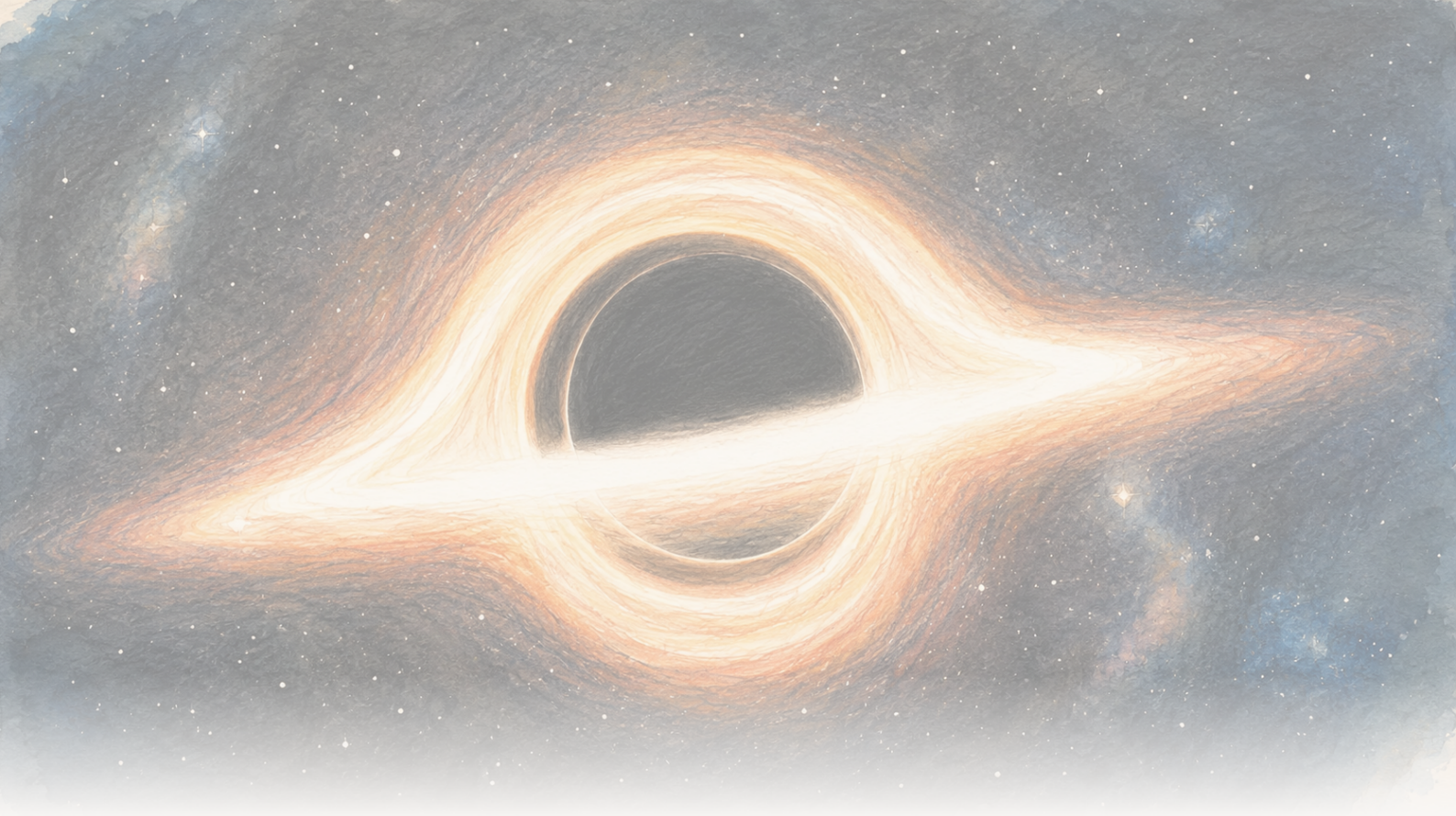




The CLEAN PAPER

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 njihova najlegantnija verzija važila je samo za crne rupe koje miruju u ravnoteži. Novi rad u časopisu *Physical Review Letters* proširuje prvi i drugi zakon na delove kvazilokalnih horizonata koji ispunjavaju uslove za segmente dinamičkog horizonta i mogu biti proizvoljno daleko od ravnoteže — tokom akrecije, kolapsa i većine faza spajanja crnih rupa. Simulacije prate kvazilokalni horizont tokom čitavog spajanja, ali zakoni još ne obuhvataju kratak interval oko koalescencije kada on nije segment dinamičkog horizonta. Osnovni okvir pripada opštoj relativnosti, uz semiklasičnu primenu na isparavanje; to nije nova kvantna gravitacija, opažanje niti rešenje problema informacija crnih rupa.*

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 očiti 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 zasniva svoj rezultat na drugačijem pojmu horizonta — **kvazilokalnom**, definisanom samo geometrijom u njegovom neposrednom susedstvu, bez pozivanja na beskonačnu budućnost. Ti **kvazilokalni horizonti** površine su koje numerički relativisti već koriste da lociraju početne crne rupe, prate spajanje i lociraju ostatak tokom čitave simulacije. Termodinamički zakoni razvijeni u ovom radu važe za delove kvazilokalnog horizonta koji ispunjavaju dodatne uslove za **segment dinamičkog horizonta**. Na svakom takvom segmentu površina se menja neposredno kao odgovor na lokalni tok energije, a ne na događaje u dalekoj budućnosti: pri pozitivnom dotoku ona raste, dok se kod isparavajućeg horizonta vremenskog tipa s negativnim tokom energije smanjuje.

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 (Kerova crna rupa) određena je samo dva broja: veličinom i vrtnjom. Autori zato grade preslikavanje koje uzima svako stanje duž segmenta dinamičkog horizonta i na svakom poprečnom preseku tog segmenta očitava dva broja ravnotežne crne rupe na koju to stanje trenutno nalikuje. Preko tog preslikavanja nasilno promenljivoj crnoj rupi duž segmenta mogu se pridružiti **temperatura i vrtnja zavisne o vremenu**.

Pomoću tih elemenata — lokalno definisane energije koja protiče kroz horizont i trenutnih intenzivnih veličina — autori proširuju prvi zakon na crne rupe proizvoljno daleko od ravnoteže. Ključno je da novi zakon opisuje **konačne promene izazvane stvarnim fizičkim procesima** — prolaskom materije i gravitacionih talasa kroz horizont —, a ne infinitezimalne korake između dva zamrznuta stanja. Uparuju ga s odgovarajućim drugim zakonom, čiji je iskaz sada *kvantitativan*: promena površine horizonta neposredno je povezana s lokalnim tokom energije — rast pri pozitivnom dotoku ili smanjenje kod isparavajućeg horizonta vremenskog tipa pod negativnim tokom. Prvi i drugi zakon zajedno vode jednom jasnom zaključku: za svaku fazu predstavljenu segmentom dinamičkog horizonta, ma koliko bila burna, prava mera entropije i dalje je površina horizonta.

Šta ovo ne dokazuje

- Rad **ne rešava** kvantnu gravitaciju. Osnovni okvir formulisan je u opštoj relativnosti; njegova primena na isparavanje crnih rupa koristi semiklasičnu aproksimaciju, u kojoj kvantna polja materije deluju na klasično prostor-vreme. I dalje pretpostavlja standardno poistovećivanje površine horizonta s entropijom, umesto da tu entropiju izvodi iz nečega fundamentalnijeg.
- **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.
- To **nije** opažanje ni merenje. Nisu uključeni ni teleskop, ni podaci, ni signal gravitacionih talasa — ovo je matematika. „Temperatura” koja se pripisuje dinamičkom horizontu dok crna rupa evoluira

precizno je definisana veličina u jednačinama, a ne nešto što bi se moglo očitati s termometra.

- Rad **još ne** daje neprekidan termodinamički opis čitave koalescencije dve crne rupe. Numeričke simulacije prate kvazilokalni horizont kroz čitavu evoluciju — od početnih crnih rupa preko spajanja do ostatka — ali u kratkom intervalu neposredno uz spajanje taj horizont ne ispunjava uslove koji se zahtevaju od segmenta dinamičkog horizonta. U pratećem radu navodi se da je termodinamički prikaz tog intervala i dalje u razradi.
- **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, imajući u vidu prirodu rezultata: ovo je pažljiv, interno konzistentan rad iz matematičke fizike vodeće grupe u ovoj oblasti, objavljen kao *Editors' Suggestion* u časopisu Physical Review Letters. Recenzirani prateći rad donosi duža izvođenja i obrađuje slučajeve koji su izostavljeni iz kratkog članka radi sažetosti.

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.
- Radi sažetosti i jednostavnosti, kratki članak predstavlja glavno izvođenje koristeći aksijalno simetrične, prostornolike dinamičke horizonte. Recenzirani prateći rad izričito analizira dinamičke horizonte vremenskog tipa i konstruiše ugaoni moment bez rotacionog Killingovog polja. Međutim, kod isparavajućih horizonata vremenskog tipa eksplicitno tretiranje povratne reakcije ograničeno je na sfernu simetriju.
- „Entropija je jednaka površini horizonta, čak i izvan ravnoteže” ubedljiva je *identifikacija* koju novi prvi i drugi zakon čine prirodnom — nije teorem izveden iz mikroskopske statistike.

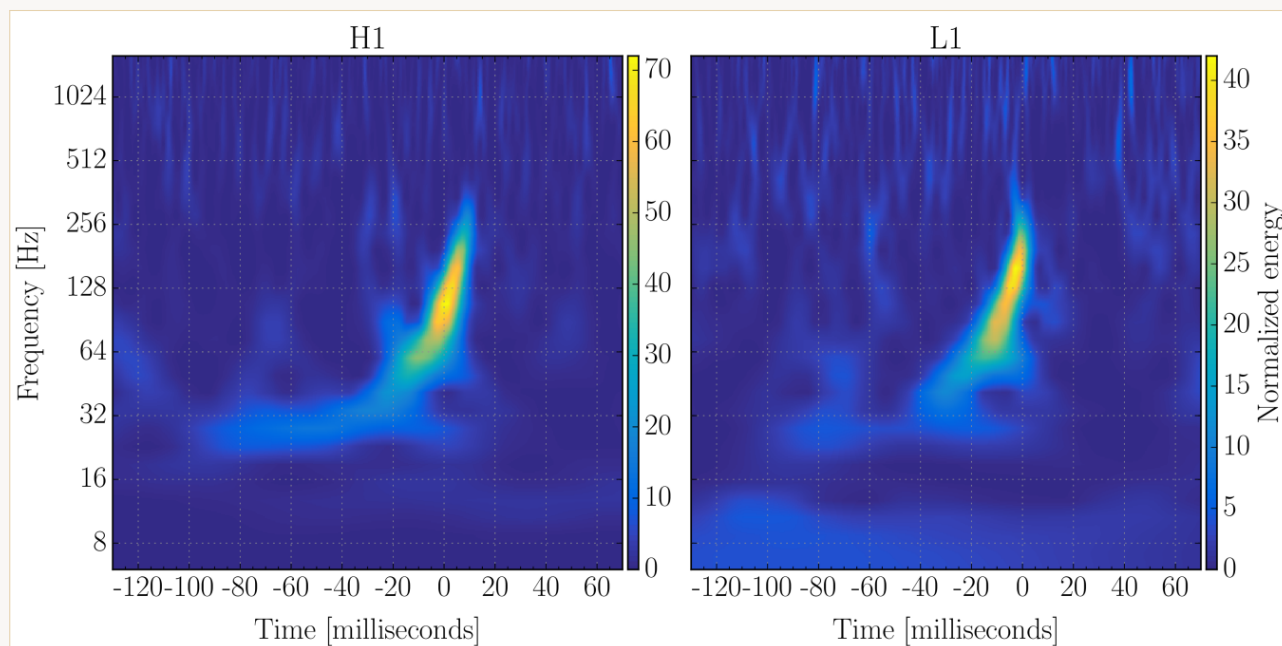
Dakle: rigorozno proširenje pedeset godina starog okvira, a ne eksperimentalno otkriće ni novi zakon prirode koji tek čeka testiranje.

Zašto je važno

Dva su razloga, jedan praktičan i jedan konceptualan.

U praksi, crne rupe koje danas zaista proučavamo — one čija spajanja „čuju” LIGO i Virgo — svoje najvažnije trenutke provode daleko od ravnoteže. Simulacije prate kvazilokalni horizont od početnih crnih rupa preko spajanja do ostatka. Veličine u ovom radu važe za delove tog horizonta koji ispunjavaju uslove za segmente dinamičkog horizonta, pa rad pruža principijelno utemeljen način da govorimo o entropiji i temperaturi crne rupe tokom većine faza evolucije spajanja i tokom kolapsa, a ne samo nakon što se sve ustali. Tokom kratkog intervala neposredno oko koalescencije simulacije

i dalje prate kvazilokalni horizont, ali on ostaje izvan sadašnjeg termodinamičkog opisa.



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 elegantni „prvi zakon” iz 1973. upoređivao je samo nepomične crne rupe u ravnoteži i nije mogao da opiše stvarni proces. Ashtekar, Paraizo i Shu proširuju prvi i drugi zakon na crne rupe proizvoljno daleko od ravnoteže — dok se hrane, kolabiraju, prolaze kroz fazu prigušenih oscilacija i kroz većinu faza spajanja — koristeći kvazilokalne horizonte, primenjujući termodinamičke zakone na njihove segmente dinamičkog horizonta i gradeći preslikavanje koje svakom stanju duž tih segmenata pridružuje trenutnu temperaturu i spin. Zaključak je da površina horizonta ostaje prava mera entropije za svaku fazu predstavljenu segmentom dinamičkog horizonta. Kratak interval neposredno uz koalescenciju još nije obuhvaćen tim termodinamičkim opisom, iako simulacije nastavljaju da prate kvazilokalni horizont. Osnovni okvir pripada

opštoj relativnosti, uz semiklasičnu primenu na isparavanje; to nije kvantna gravitacija, opažanje, brojanje mikrostanja niti 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 horizontima i onim njihovim delovima koji ispunjavaju uslove za segmente dinamičkog horizonta. 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: Osnovno izvođenje pripada opštoj relativnosti, dok primena na isparavanje s horizontom vremenskog tipa koristi semiklasičnu aproksimaciju; kratak interval neposredno uz koalescenciju binarnog sistema nije predstavljen segmentom dinamičkog horizonta i njegov termodinamički opis još je u razradi, iako numeričke simulacije nastavljaju da prate kvazilokalni horizont; eksplicitno tretiranje povratne reakcije isparavajućih horizonata vremenskog tipa ograničeno je na sfernu simetriju; poistovećivanje površine s entropijom pretpostavlja se, a ne dokazuje na osnovu statističke mehanike.

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.

Ažuriranja nakon objavljivanja

• Ispravka · 2026-08-27

Nakon povratnih informacija autora za korespondenciju Abhaya Ashtekara, ispravili smo dve tvrdnje koje su vremenske i neaksijalno simetrične slučajeve opisivale kao da su u recenziranom pratećem radu samo argumentovani, umesto da su izričito obrađeni. Tokom pregleda takođe smo razjasnili da okvir još ne obuhvata kratak interval neposredno uz koalescenciju binarnog sistema, kada kvazilokalni horizont ne ispunjava uslove za segment dinamičkog horizonta.

• Ispravka · 2026-08-28

Nakon dodatnog pojašnjenja autora za prepisku Abhaya Ashtekara, napravili smo razliku između kvazilokalnih horizonata, koje numeričke simulacije prate od početnih crnih rupa preko spajanja do

ostatka, i delova koji ispunjavaju dodatne uslove za segmente dinamičkog horizonta, na kojima važe termodinamički zakoni.

Izvori

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>