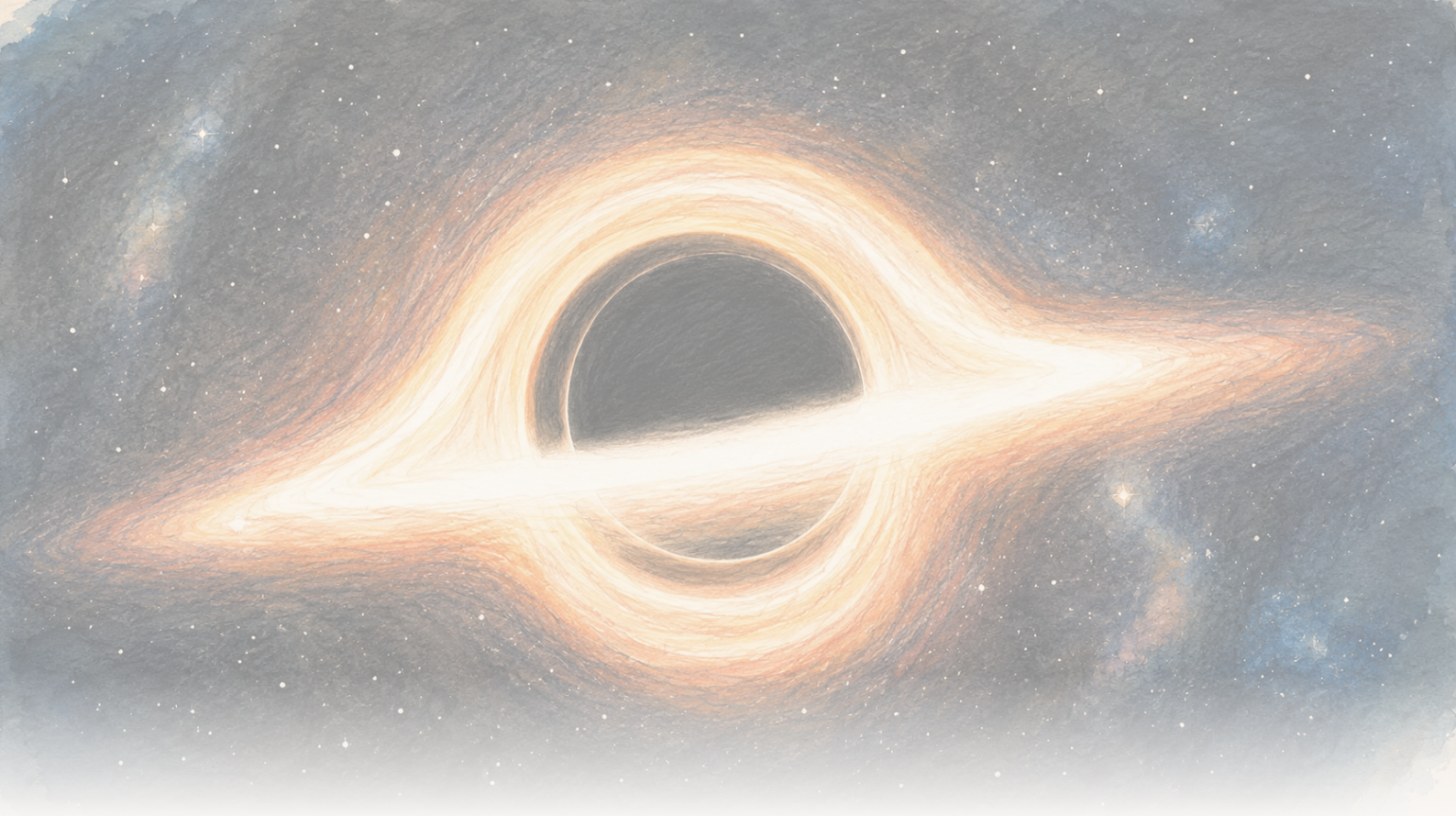




The CLEAN PAPER

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

Čierne diery sa riadia termodynamickými „zákonmi“ — nový výsledok ich rozširuje aj na prudko nerovnovážne čierne diery

Od 70. rokov vieme, že čierne diery sa riadia zákonmi pripomínajúcimi termodynamiku, no ich najčistejšia podoba platila iba pre pokojné čierne diery v rovnováhe. Nový článok v Physical Review Letters rozširuje prvý a druhý zákon na čierne diery, ktoré sa rýchlo menia — pohlcujú hmotu, splývajú alebo vyžarujú — pomocou lokálne definovaných „dynamických horizontov“. Umožňuje priradiť teplotu a entropiu aj prudko sa vyvíjajúcej čiernej diere. Ide o matematický výsledok v klasickej všeobecnej relativite, nie o novú kvantovú gravitáciu, pozorovanie ani vyriešenie informačného paradoxu čiernych dier.

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

Čierne diery majú „zákony“ podobné termodynamike. Úhľadná verzia však fungovala iba vtedy, keď sa nič nedialo.

Jedným z najzvláštnejších faktov fyziky je, že čierne diery sa správajú ako horúce telesá. Začiatkom 70. rokov si Bekenstein a Hawking všimli, že rovnice opisujúce čierne diery sa člen po člene podobajú zákonom termodynamiky: čierna diera má entropiu úmernú ploche svojho horizontu a teplotu úmernú povrchovej gravitácii. Hawking potom ukázal, že teplota je skutočná v najhlbšom zmysle — čierna diera naozaj veľmi slabo žiari tepelným žiarením.

Čo je Hawkingovo žiarenie?

V klasickej fyzike z čiernej diery nič neunikne, takže by mala byť dokonale čierna a nemať vôbec žiadnu teplotu. Stephen Hawking v roku 1974 ukázal, že po zahrnutí kvantovej teórie v blízkosti horizontu sa to mení: čierna diera vyžaruje slabé tepelné žiarenie, a preto pomaly stráca hmotnosť — „vyparuje sa“. Spektrum je tepelné pri Hawkingovej teplote, hoci šírenie zakriveným časopriestorom mení žiarenie, ktoré dorazí do nekonečna. V bežnom heuristickom obraze — nie v Hawkingovom skutočnom odvodení — kvantové fluktuácie tesne za horizontom vytvárajú páry, z ktorých jeden partner unikne ako žiarenie a druhý spadne dovnútra.

Kľúčové je, že táto teplota je *nepriamo* úmerná hmotnosti čiernej diery: čím je menšia, tým je teplejšia. Pri každej čiernej diere, ktorú by mohol vidieť ďalekohľad, je teplota fantasticky nízka — oveľa nižšia než teplota prázdneho priestoru okolo nej — takže žiarenie je v praxi úplne zanedbateľné a nikdy sa priamo nezmeralo. Jeho význam je koncepčný: Hawkingovo žiarenie premieňa *analógiu* medzi mechanikou čiernych dier a termodynamikou na skutočnú termodynamiku. Keďže čierna diera naozaj má teplotu, „teplota“ a „entropia“ v týchto zákonoch sú reálne termodynamické veličiny, nie formálna náhoda. (Toto je pozadie súčasnej práce, nie jeden z jej výsledkov.)

Toto prepojenie stojí na výsledku nazývanom **prvý zákon mechaniky čiernych dier** (Bardeen, Carter a Hawking, 1973). Slovom: ak čiernu dieru mierne posuniete z jedného ustáleného stavu do blízkeho ustáleného stavu, zmena jej hmotnosti sa rovná teplote násobenej zmenou entropie plus člen súvisiaci s rotáciou. Je to obdoba termodynamického vzťahu „dodané teplo sa rovná teplote krát zmena entropie“.

Háčik sa skrýva vo výraze *blízky ustálený stav*. Čistý zákon z roku 1973 porovnáva dve čierne diery pokojne sediace v rovnováhe, ktoré sa líšia iba nekonečne malou zmenou. V skutočnosti vôbec neopisuje **proces** — čiernu dieru pohlcujúcu hviezdu, splynutie dvoch čiernych dier ani novovzniknutú čiernu dieru doznievajúcu po násilnom zrode. Práve tieto situácie chceme chápať najviac a sú presným opakom „pokojného sedenia“. Úhľadný zákon mlčí práve vtedy, keď je čierna diera najzaujímavejšia.

Prečo zjavné riešenie nefunguje

Mohlo by sa zdať, že náprava je jednoduchá: stačí sledovať, ako horizont rastie pri páde hmoty dovnútra. Problém je, *ktorý* horizont.

Horizont, ktorý si väčšina ľudí predstavuje — **horizont udalostí**, skutočná hranica bez návratu — má jemnú a neprijemnú vlastnosť: je definovaný celou budúcnosťou vesmíru. Ak chcete vedieť, kde je horizont udalostí *práve teraz*, museli by ste poznať všetko, čo do čiernej diery kedy spadne, navždy. Nie je to technický detail. Horizont udalostí môže začať rásť v úplne prázdnej a plochej oblasti priestoru skôr, než dorazí hmota, ktorá ho neskôr nakrmi, jednoducho preto, že táto hmota je predurčená doraziť. Jeho plocha môže rásť tam, kde sa lokálne nedeje vôbec nič.

Ako môže horizont rásť skôr, než dorazí hmota?

Vedecký názov tejto zvláštnosti je **teleologická povaha horizontu udalostí**, označovaná aj ako jeho **globálna definícia**. „Teleologický“ tu neznamena, že horizont má účel, predpovedá budúcnosť alebo posila vplyv späť v čase. Znamená to, že o tom, či udalosť leží vo vnútri horizontu, možno rozhodnúť iba z úplnej budúcej histórie časopriestoru.

Formálna definícia hovorí to isté stručnejšie. Predstavte si **budúce nulové nekonečno** — nazývané „I-plus“ a zapisované $\mathcal{I}^+$ — ako cieľ, ku ktorému dorazí svetlo unikajúce navždy do inak prázdnej, nekonečne vzdialenej budúcnosti. Horizont udalostí je hranica medzi udalosťami, z ktorých môže von smerujúci svetelný signál nakoniec dosiahnuť tento cieľ, a udalosťami, z ktorých ho nikdy dosiahnuť nemôže. V štandardnom zápise všeobecnej relativity ide o hranicu kauzálnej minulosti budúceho nulového nekonečna: $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$. Keďže definícia obsahuje slovo *nikdy*, žiadne meranie vykonané iba tu a teraz nedokáže horizont udalostí presne lokalizovať.

Zvláštnosť dobre ukáže kolabujúca sférická škrupina. Pred jej príchodom môže byť vnútorná oblasť prázdna a lokálne plochá. Vyšlite zo stredu von svetelné lúče v postupne neskorších časoch: skoršie uniknú, kým neskoršie stretnú kolabujúcu škrupinu v geometrii, z ktorej sa už nedostanú. Horizont udalostí je hranicou medzi týmito dvoma výsledkami. Pri spätnom sledovaní začína táto hranica v strede a rozširuje sa ešte prázdny, plochým vnútrom skôr, než k nemu škrupina dorazí. Rast plochy tam neoznamuje žiadny miestny tok hmoty; zaznamenáva, ktoré únikové cesty zostávajú otvorené v dokončenom časopriestore.

Nič v tomto obraze nepôsobí späť v čase. Keby sa škrupina odklonila a čierna diera by nevznikla, dokončený časopriestor by bol iný a táto skoršia oblasť by nikdy nebola súčasťou horizontu udalostí. Poučenie nie je, že budúcnosť mení minulosť, ale že horizont udalostí je **globálna kauzálna hranica**, nie povrch, ktorý môže blízky pozorovateľ odhaliť v jedinom okamihu. Práve preto fyzici používajú kvázilokálne alebo dynamické horizonty, keď potrebujú sledovať meniacu sa čiernu dieru.

To robí horizont udalostí nepoužiteľným ako priebežný opis „stavu“ čiernej diery. V počítačovej simulácii ho nemožno presne určiť, kým sa simulácia neskončí, a už vôbec sa pomocou neho nedá sledovať teplota či entropia okamih po okamihu.

Riešenie: horizont, ktorý možno definovať lokálne

Nový článok Abhaya Ashtekara, Daniela Paraiza a Jonathana Shua stavia na inom pojme horizontu — **kvázilokálnom**, definovanom iba geometriou vo vlastnom okolí bez odkazu na nekonečnú budúcnosť. Tieto „úseky dynamického horizontu“ sú povrchy, ktoré numerickí relativisti už používajú na vyhľadávanie čiernych dier v simuláciách splynutí, práve preto, že sú lokálne a poctivé: ich plocha rastie iba tam, kde cez ne skutočne prechádza energia.

Autori navyše riešia ťažšiu polovicu problému. V bežnej termodynamike je systém ďaleko od rovnováhy veľmi neuchopiteľný: nemožno mu čisto priradiť jedinu teplotu alebo tlak, pretože tieto veličiny sú dobre definované až po ustálení. Rovnaký problém majú čierne diery — až kým, ako ukazujú autori, nevyužijeme osobitnú vlastnosť všeobecnej relativity. Čierna diera v rovnováhe — Kerrova čierna diera — je úplne určená iba dvoma číslami: veľkosťou a rotáciou. Autori preto zostroja zobrazenie, ktoré ku každému prudko sa vyvíjajúcemu nerovnovážnemu horizontu v každom okamihu priradí dve čísla rovnovážnej čiernej diery, ktorej sa práve podobá. Vďaka tomu možno prudko meniacej sa čiernej diere napokon priradiť **časovo závislú teplotu a rotáciu**.

S týmito prvkami — lokálne definovanou energiou pretekajúcou cez horizont a okamžitými intenzívnymi veličinami — rozširujú prvý zákon na čierne diery ľubovoľne ďaleko od rovnováhy. Nový zákon zásadne opisuje **konečné zmeny spôsobené skutočnými fyzikálnymi procesmi** — hmotou a gravitačnými vlnami prechádzajúcimi horizontom — nie nekonečne malé kroky medzi dvoma zamrznutými stavmi. Dopĺňa ho zodpovedajúci druhý zákon, ktorý je teraz *kvantitatívny*: plocha horizontu rastie o množstvo priamo zviazané s energiou, ktorá doň vtekla. Spoločne prvý a druhý zákon smerujú k jednému čistému záveru — aj pri čiernej diere uprostred najnásilnejšej predstaviteľnej udalosti zostáva správnou mierou entropie plocha jej horizontu.

Čo to nedokazuje

- **Nerieši kvantovú gravitáciu.** Ide o výsledok v *klasicknej* všeobecnej relativite, ktorý používa štandardné stotožnenie plochy horizontu s entropiou. Entropiu neodvodzuje z niečoho základnejšieho.
- **Nepočíta mikrostavy ani nevysvetľuje, z čoho je entropia čiernej diery „vyrobená“.** Rozširuje účtovníctvo termodynamiky čiernych dier; neotvára škatuľu a neodhaľuje mikroskopické stupne voľnosti.
- **Nerieši informačný paradox čiernych dier.** Tento problém patrí do kvantovej teórie a článok sa ho nedotýka.
- **Nie je to pozorovanie ani meranie.** Nie sú v ňom ďalekohľady, dáta ani signál gravitačných vln — je to matematika. „Teplota“ splývajúcej čiernej diery je tu presne definovaná veličina v rovniciach, nie údaj, ktorý by sa dal odčítať teplomerom.
- **Nevyvracia Bekensteina ani Hawkinga.** Ich obraz *rozširuje* do dynamického režimu, v ktorom pôvodný zákon platný iba v rovnováhe nemal čo povedať.

Aké silné sú dôkazy?

Silné vzhľadom na druh výsledku: ide o starostlivú a vnútorne konzistentnú matematicko-fyzikálnu prácu od poprednej skupiny v odbore, publikovanú ako *Editors' Suggestion* v *Physical Review Letters*; sprievodný článok rozpracúva dlhšie odvodenia.

Poctivé výhrady sa týkajú *druhu*, nie kvality:

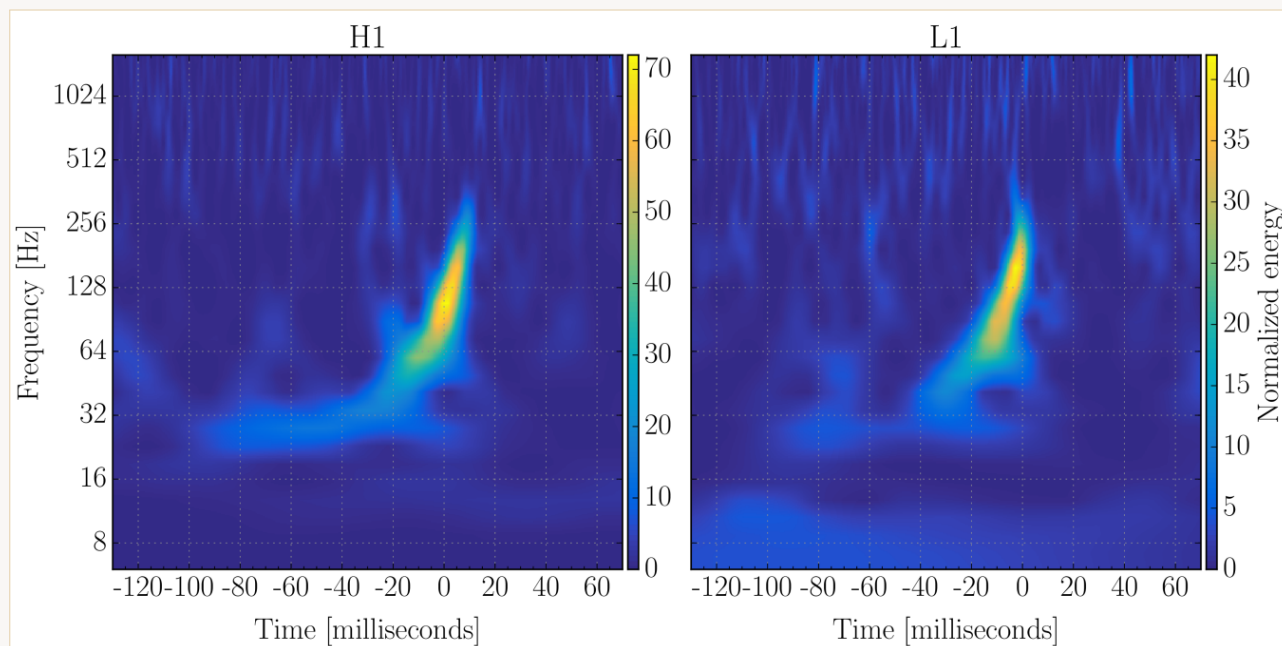
- Práca stojí na štandardnom predpoklade, že plocha horizontu *je* entropiou — plocha delená štvornásobkom Newtonovej a Planckovej konštanty v príslušných jednotkách. Keby úplná kvantová teória gravitácie túto identifikáciu zmenila, zmenila by sa aj interpretácia.
- Hlavné výpočty sú vypracované pre najbežnejší prípad — priestorupodobné dynamické horizonty s osovou symetriou. Autori tvrdia, že obmedzenia nie sú zásadné, no úplne všeobecné tvrdenie sa opiera aj o výsledky v ďalšej práci.
- „Entropia sa rovná ploche horizontu aj mimo rovnováhy“ je presvedčivá *identifikácia*, ktorú nové zákony robia prirodzenou — nie teoréma odvodená z mikroskopickej štatistiky.

Teda: rigorózne rozšírenie päťdesiatročného rámca, nie experimentálny objav ani nový prírodný zákon čakajúci na test.

Prečo na tom záleží

Z dvoch dôvodov, praktického a koncepčného.

Prakticky: čierne diery, ktoré dnes skutočne skúmame — tie, ktorých splynutia počujú LIGO a Virgo — trávajú najdôležitejšie okamihy ďaleko od rovnováhy. Veličiny z tejto práce sú zostrojené z rovnakých lokálne definovaných horizontov, ktoré simulácie už sledujú, takže poskytujú principiálny spôsob hovoriť o entropii a teplote čiernej diery *počas* splynutia alebo kolapsu, nielen pred ním a po ňom.



GW150914, prvý priamo zachytený signál gravitačných vĺn, pochádzal zo splynutia dvoch čiernych dier. Tieto časovo-frekvenčné mapy zobrazujú signál v LIGO Hanford (vľavo) a LIGO Livingston (vpravo): v oboch detektoroch jasná stopa stúpa nahor, keď frekvencia signálu rastie smerom k splynutiu. Je to skutočný príklad systému čiernych dier ďaleko od rovnováhy; poskytuje kontext pre nový termodynamický rámec, nie pozorovací dôkaz tohto rámca.

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

Koncepcne je termodynamické správanie čiernych dier jednou z mála konkrétnych stôp ku kvantovej gravitácii — miestom, kde sa viditeľne stretávajú gravitácia, kvantová teória a termodynamika. Presnejšie určenie toho, čo znamenajú „entropia“ a „teplota“ pri prudko sa meniacej čiernej diere, sprísňuje cieľ, ktorý musí zasiahnuť každá budúca kvantová teória. Neodpovedá na hlbokú otázku, čím entropia čiernej diery v skutočnosti je. Formuluje ju presnejšie — a to je v tejto oblasti fyziky veľká časť práce.

Stručné zhrnutie

Čierne diery sa riadia zákonmi pripomínajúcimi termodynamiku, ale čistý „prvý zákon“ z roku 1973 porovnával iba pokojné čierne diery v rovnováhe a nevedel opísať skutočný proces. Ashtekar, Paraizo a Shu rozširujú prvý aj druhý zákon na čierne diery ľubovoľne ďaleko od rovnováhy — pri splynutí, pohlcovaní hmoty či doznievaní — pomocou lokálne definovaných „dynamických horizontov“ a zobrazenia, ktoré meniacej sa čiernej diere priradí okamžitú teplotu a rotáciu. Výsledkom je, že plocha horizontu zostáva správnou mierou entropie aj počas násilných udalostí. Ide o rigorózný výsledok v klasickej všeobecnej relativite, nie o kvantovú gravitáciu, pozorovanie, počítanie mikrostavov ani riešenie informačného paradoxu.

Kontrola bez príkras

Čo práca ukazuje: Matematicky konzistentné rozšírenie prvého a druhého zákona mechaniky čiernych dier na plne dynamické čierne diery ďaleko od rovnováhy, založené na kvázilokálnych dynamických horizontoch. Definuje konečný prvý zákon založený na procese a kvantitatívny druhý zákon a robí prirodzeným stotožnenie entropie dynamickej čiernej diery s plochou jej horizontu.

Čo je skutočné, ale interpretačné: Identifikácia „entropia = plocha horizontu“ mimo rovnováhy. Nové zákony ju robia presvedčivou, ale preberá štandardný klasický predpoklad o vzťahu plochy a entropie namiesto toho, aby ho odvodila.

Čo práca neukazuje: Kvantovú teóriu gravitácie; mikroskopický pôvod alebo „počet“ entropie čiernej diery; vyriešenie informačného paradoxu; akýkoľvek pozorovací či experimentálny výsledok; teplotu, ktorú by bolo možné fyzicky zmerať.

Hlavné obmedzenia: Výlučne klasická všeobecná relativita; hlavné výsledky dokázané pre bežný priestorupodobný a osovo symetrický prípad, pričom všeobecnosť sa opiera o sprievodnú prácu; stotožnenie plochy s entropiou sa predpokladá, nie odvodzuje zo štatistickej mechaniky.

Akú veľkú dôveru by mal mať bežný čitateľ? Vysokú dôveru, že ide o pevný a uznávaný teoretický pokrok, ktorý skutočne rozširuje termodynamiku čiernych dier do dynamického režimu. Rovnako vysokú dôveru, že nejde o nové pozorovania, kvantovú gravitáciu ani vyriešenie známeho informačného problému. Správny postoj: skutočný krok v porozumení, urobený kriedou, nie ďalekohľadom.

Zdroje

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

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