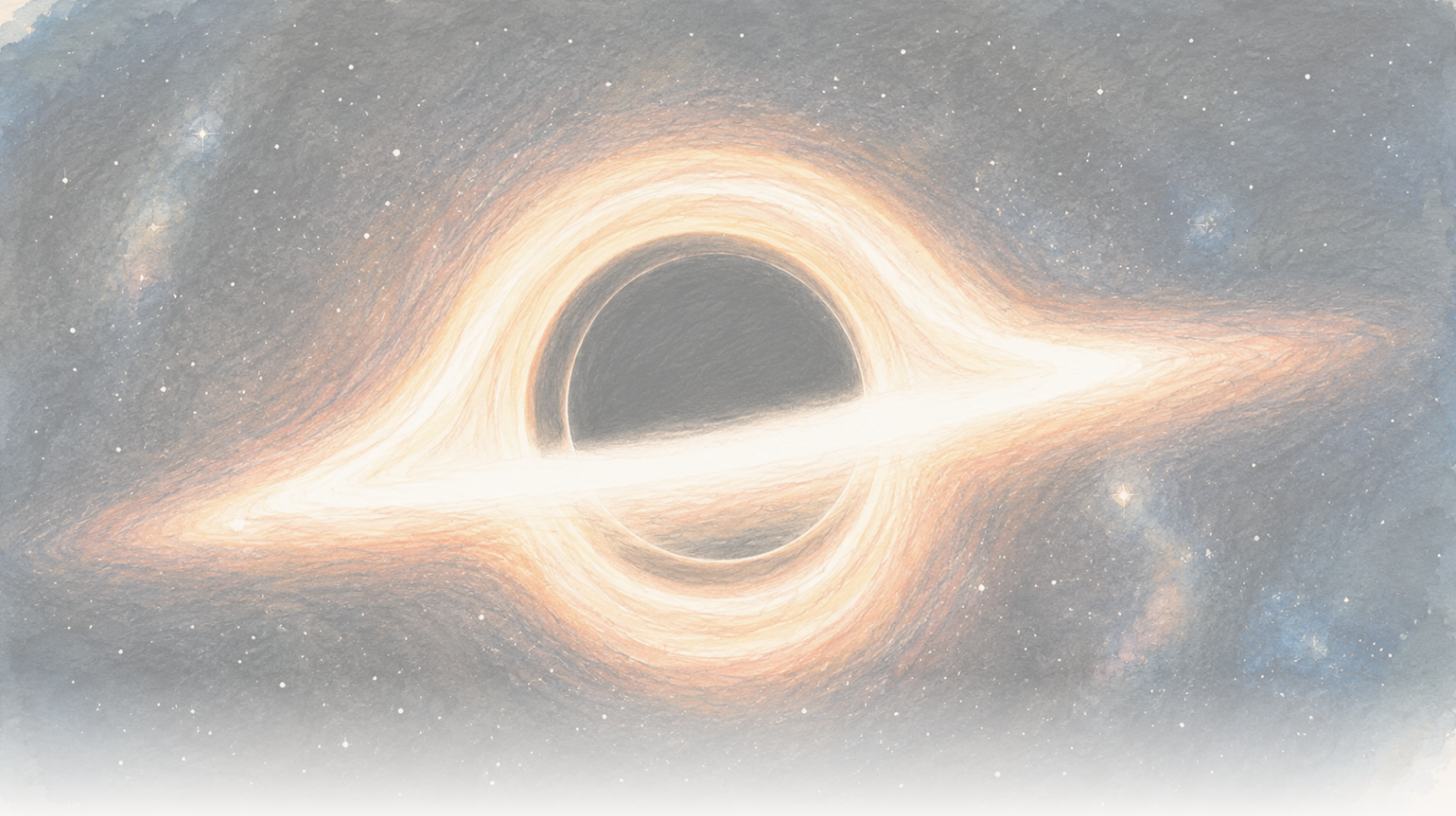




The CLEAN PAPER

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

Černé díry se řídí termodynamickými „zákony“ — nový výsledek je rozšiřuje na černé díry prudce vychýlené z rovnováhy

*Od 70. let víme, že černé díry dodržují zákony připomínající termodynamiku, ale jejich nejčistší verze platila pouze pro černé díry tiše setrvávající v rovnováze. Nový článek v *Physical Review Letters* rozšiřuje první a druhý zákon na černé díry, které se rychle mění — pohlcují hmotu, slučují se nebo vyzařují — pomocí lokálně definovaných „dynamických horizontů“. Umožňuje fyzikům přiřadit teplotu a entropii i prudce se vyvíjející černé díře. Jde o matematický výsledek v klasické obecné relativitě, nikoli o novou kvantovou gravitaci, pozorování ani řešení informačního paradoxu černých děr.*

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

Černé díry mají „zákony“, které připomínají termodynamiku. Úhledná verze však fungovala jen tehdy, když se nic nedělo.

Jedním z nejpodivuhodnějších faktů ve fyzice je, že se černé díry chovají jako horké objekty. Na počátku 70. let si Bekenstein a Hawking všimli, že rovnice popisující černé díry odpovídají člen po členu zákonům termodynamiky: černá díra má entropii úměrnou ploše svého horizontu a teplotu úměrnou povrchové gravitaci. Hawking pak ukázal, že tato teplota je skutečná v tom nejhlubším smyslu — černá díra opravdu, byť nesmírně slabě, září tepelným zářením.

Co je Hawkingovo záření?

V klasické fyzice z černé díry nic neunikne, takže by měla být dokonale černá a neměla by mít vůbec žádnou teplotu. Stephen Hawking však v roce 1974 ukázal, že jakmile se v blízkosti horizontu zohlední kvantová teorie, situace se změní: černá díra vydává slabé tepelné záření, a proto pomalu ztrácí hmotnost neboli se „vypařuje“. Spektrum je tepelné při Hawkingově teplotě, zatímco šíření zakřiveným prostoročasem mění podobu záření, které dorazí do nekonečna. V běžném heuristickém obrazu — který však není Hawkingovým skutečným odvozením — vytvářejí kvantové fluktuace těsně vně horizontu dvojice částic, z nichž jedna unikne jako záření a druhá spadne dovnitř.

Klíčové je, že tato teplota je *nepřímo* úměrná hmotnosti černé díry: čím menší díra, tím je teplejší. U jakékoli černé díry, kterou by mohl spatřit dalekohled, je teplota fantasticky nízká — mnohem nižší než teplota prázdného prostoru kolem ní — takže je toto záření v praxi zcela zanedbatelné a nikdy nebylo přímo změřeno. Jeho význam je koncepční: právě Hawkingovo záření mění *analogii* mezi mechanikou černých děr a termodynamikou ve skutečnou fyzikální souvislost. Protože černá díra opravdu má teplotu, jsou „teplota“ a „entropie“ v těchto zákonech skutečnými termodynamickými veličinami, nikoli formální shodou. (Jde o kontext k současnému článku, nikoli o jeden z jeho výsledků.)

Tato souvislost stojí na výsledku známém jako **první zákon mechaniky černých děr** (Bardeen, Carter a Hawking, 1973). Slovy říká: pokud černou díru nepatrně vychýlíte z jednoho ustáleného stavu do blízkého ustáleného stavu, změna její hmotnosti se rovná její teplotě krát změna entropie plus člen související s rotací. Je to obdoba tvrzení „dodané teplo se rovná teplotě krát změna entropie“ pro černé díry.

Háček se skrývá ve spojení *blízký ustálený stav*. Úhledný zákon z roku 1973 porovnává dvě černé díry, které tiše setrvávají v rovnováze a liší se pouze nekonečně málo. Ve skutečnosti vůbec nepopisuje **proces** — černou díru pohlcující hvězdu, dvě slučující se černé díry ani nově vzniklou díru, která po násilném zrodu doznívá. Právě těmito situacím chceme nejvíce porozumět, a přitom jsou pravým opakem „klidného sezení“. Úhledný zákon přestává mluvit právě tehdy, když je černá díra zajímavá.

Proč zjevná oprava nefunguje

Mohlo by se zdát, že řešení je snadné: stačí sledovat, jak horizont roste, když do něj padá hmota. Problém je, *který* horizont.

Horizont, který si většina lidí představí — **horizont událostí**, skutečná hranice, za níž není návratu — má jemnou a nepříjemnou vlastnost: je definován celou budoucností vesmíru. Chcete-li vědět, kde se horizont událostí nachází *právě teď*, museli byste vědět všechno, co do černé díry kdy v budoucnu spadne. To není technická drobnost. Horizont událostí může začít růst ve zcela prázdné, ploché oblasti prostoru *ještě předtím*, než dorazí hmota, která jej nakrmí, jednoduše proto, že tato hmota je předurčena dorazit později. Jeho plocha se může zvětšovat tam, kde se lokálně neděje vůbec nic.

Jak může horizont růst dříve, než dorazí hmota?

Vědecký název tohoto problému je **teleologická povaha horizontu událostí**, případně jeho **globální definice**. „Teleologický“ zde neznámá, že horizont sleduje nějaký účel, předpovídá budoucnost nebo vysílá vliv zpět v čase. Znamená to, že o tom, zda určitá událost leží uvnitř horizontu, lze rozhodnout pouze z úplné budoucí historie prostoročasu.

Formální definice říká totéž úsporněji. Představte si **budoucí nulové nekonečno** — vyslované „I-plus“ a zapisované $\mathcal{I}^+$ — jako cíl, k němuž dospěje světlo, které navždy uniká do jinak prázdné, nekonečně vzdálené budoucnosti. Horizont událostí je hranice mezi událostmi, z nichž může světelný signál vyslaný ven nakonec k tomuto cíli dorazit, a událostmi, z nichž žádný takový signál nikdy neunikne. Ve standardním zápisu obecné relativity jde o hranici kauzální minulosti budoucího nulového nekonečna: $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$. Protože je do této definice zabudováno slovo *nikdy*, nelze horizont událostí přesně určit žádným měřením provedeným pouze tady a teď.

Podivnost dobře ukazuje kolabující kulová slupka. Než slupka dorazí, může být oblast uvnitř prázdná a lokálně plochá. Vyšlete ze středu směrem ven světelné paprsky v postupně pozdějších okamžicích: dřívější paprsky uniknou, zatímco pozdější narazí na kolabující slupku v geometrii, z níž se již nedostanou. Horizont událostí je hranice oddělující tyto dva výsledky. Když ji sledujeme zpět, začíná ve středu a rozpíná se dosud prázdným, plochým vnitřkem ještě předtím, než k ní slupka dorazí. Rostoucí plocha zde nehlásí žádný místní tok hmoty; zaznamenává, které únikové cesty zůstávají v dokončeném prostoročase otevřené.

V tomto obraze nic nepůsobí zpět v čase. Kdyby byla slupka odkloněna a žádná černá díra nevznikla, dokončený prostoročas by byl jiný a dřívější oblast by součástí horizontu událostí nebyla. Poučení nespočívá v tom, že budoucnost mění minulost, ale v tom, že horizont událostí je **globální kauzální hranice**, nikoli povrch, který může blízký pozorovatel zjistit v jediném okamžiku. Právě proto fyzici používají kvazilokální nebo dynamické horizonty, potřebují-li sledovat měnící se černou díru.

Tím se horizont událostí stává nepoužitelným jako průběžný popis „stavu“ černé díry. V počítačové simulaci jej nelze určit dříve, než simulace skončí, a už vůbec jej nelze využít ke sledování teploty nebo entropie okamžik po okamžiku.

Klíčový krok: horizont, který lze definovat lokálně

Nový článek Abhaye Ashtekara, Daniela Paraiza a Jonathana Shua staví svůj výsledek na jiném pojetí horizontu — **kvazilokálním**, definovaném pouze geometrií ve vlastním okolí, bez odkazu na nekonečnou budoucnost. Tyto „úseky dynamického horizontu“ jsou povrchy, které numeričtí relativisté již používají k vyhledávání černých děr v simulacích srážek, právě proto, že jsou lokální a poctivé: jejich plocha roste pouze tam, kde je skutečně překračuje energie.

Autoři navíc řeší obtížnější polovinu problému. V běžné termodynamice je systém daleko od rovnováhy pověštně neuchopitelný: nelze mu jednoznačně přiřadit jedinou teplotu nebo tlak, protože tyto veličiny jsou dobře definovány až po ustálení systému. Černé díry mají stejný problém — dokud, jak autoři ukazují, nevyužijeme zvláštní vlastnost obecné relativity. Černá díra v rovnováze (Kerrova černá díra) je určena pouhými dvěma čísly: svou velikostí a rotací. Autoři proto vytvářejí zobrazení, které libovolnému divoce se vyvíjejícímu, nerovnovážnému horizontu v každém okamžiku přiřadí dvě čísla rovnovážné černé díry, jíž se právě podobá. Díky tomuto zobrazení lze i prudce se měnící černé díře přiřadit **časově proměnnou teplotu a rotaci**.

S těmito prvky — lokálně definovanou energií proudící přes horizont a okamžitými intenzivními veličinami — rozšiřují první zákon na černé díry libovolně vzdálené od rovnováhy. Zásadní je, že nový zákon popisuje **konečné změny způsobené skutečnými fyzikálními procesy** (hmotou a gravitačními vlnami procházejícími horizontem), nikoli nekonečně malé kroky mezi dvěma zmrazenými stavy. Doplnuje jej odpovídající druhý zákon, jehož tvrzení je nyní *kvantitativní*: plocha horizontu naroste o velikost přímo svázanou s energií, která dovnitř přitekla. Společně vedou první a druhý zákon k jedinému jednoznačnému závěru — i u černé díry uprostřed té nejnásilnější představitelné události zůstává správnou mírou entropie plocha jejího horizontu.

Co tento výsledek *nedokazuje*

- **Neřeší** kvantovou gravitaci. Jde o výsledek v *klasické* obecné relativitě využívající standardní ztotožnění plochy horizontu s entropií. Tuto entropii neodvozuje z ničeho fundamentálnějšího.
- **Nepočítá** mikrostavy ani nevysvětluje, *z čeho* se entropie černé díry skládá. Rozšiřuje účetnictví termodynamiky černých děr; neotevívá schránku a neodhaluje mikroskopické stupně volnosti.
- **Neřeší** informační paradox černých děr. Tento problém patří do kvantové teorie a článek se jej nedotýká.
- **Nejde** o pozorování ani měření. Nejsou zde žádné dalekohledy, data ani signály gravitačních vln — je to matematika. „Teplota“ slučující se černé díry je zde přesně definovaná veličina v rovnicích, nikoli něco, co by bylo možné odečíst teploměrem.
- **Nevyvrací** Bekensteina a Hawkinga. Jejich obraz *rozšiřuje* do dynamického režimu, o němž původní zákon platný jen v rovnováze nic neříkal.

Jak silné jsou důkazy?

Silné v rámci toho, o jaký typ výsledku jde: pečlivá a vnitřně konzistentní práce z matematické fyziky od přední skupiny v oboru, publikovaná jako *Editors' Suggestion* v časopise *Physical Review Letters* (doprovodný článek obsahuje delší odvození).

Poctivé výhrady se týkají *druhu* důkazu, nikoli jeho kvality:

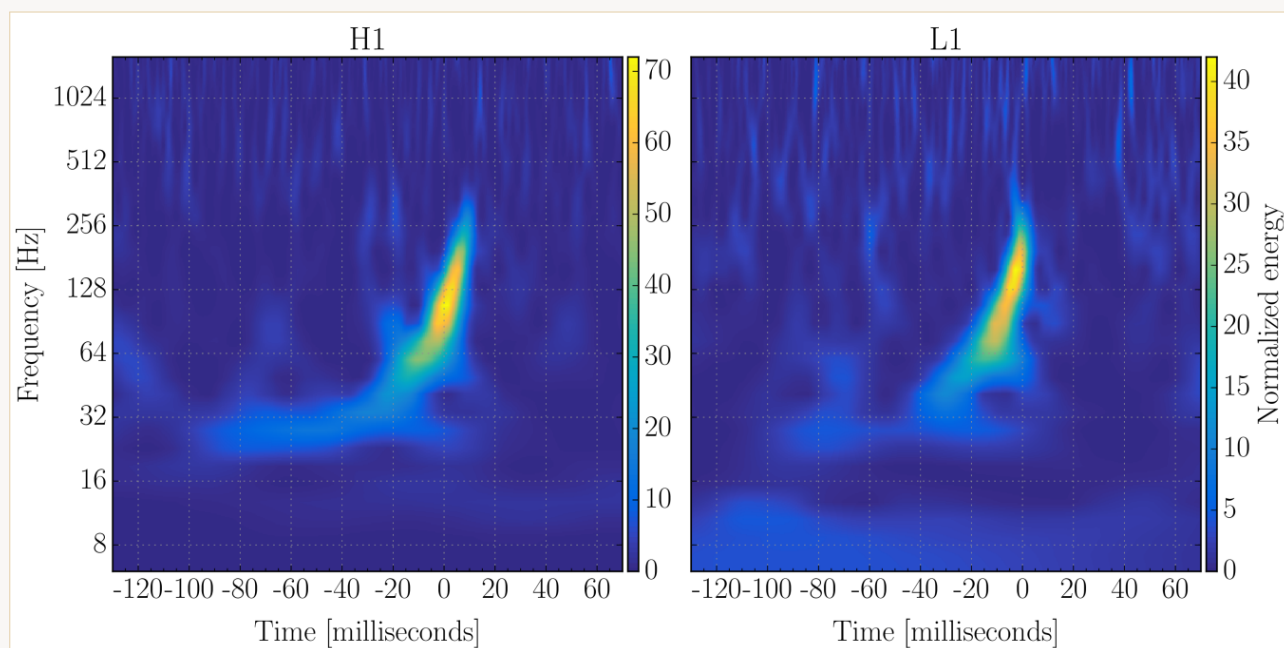
- Práce spočívá na obvyklém předpokladu, že plocha horizontu *je* entropie (plocha dělená čtyřnásobkem Newtonovy a Planckovy konstanty). Kdyby úplná kvantová teorie gravitace toto ztotožnění někdy změnila, změnila by se s ním i interpretace.
- Hlavní výpočty jsou provedeny pro nejběžnější případ (prostorupodobné dynamické horizonty s osovou symetrií); autoři tvrdí, že omezení nejsou zásadní, avšak plně obecné tvrzení se opírá o výsledky uvedené jinde.
- „Entropie se rovná ploše horizontu i mimo rovnováhu“ je přesvědčivé *ztotožnění*, které nové první a druhé zákony činí přirozeným — nikoli teorém odvozený z mikroskopické statistiky.

Jde tedy o rigorózní rozšíření padesát let starého rámce, nikoli o experimentální objev ani o nový přírodní zákon čekající na ověření.

Proč na tom záleží

Ze dvou důvodů, jednoho praktického a jednoho koncepčního.

Prakticky vzato tráví černé díry, které dnes skutečně studujeme — ty, jejichž slučování zachycují LIGO a Virgo — své nejdůležitější okamžiky daleko od rovnováhy. Veličiny z tohoto článku jsou vystavěny z týchž lokálně definovaných horizontů, které již sledují simulace, a poskytují tak principiální způsob, jak mluvit o entropii a teplotě černé díry *během* sloučení nebo kolapsu, nikoli pouze před ním a po něm.



GW150914, první přímo detekovaný signál gravitačních vln, pocházel ze sloučení dvou černých děr. Tyto časově-frekvenční mapy ukazují signál v detektoru LIGO Hanford (vlevo) a LIGO Livingston (vpravo): v obou detektorech stoupá jasná stopa vzhůru, jak se frekvence signálu směrem ke sloučení zvyšuje. Jde o skutečný příklad systému černých děr daleko od rovnováhy; slouží jako kontext pro nový termodynamický rámec, nikoli jako pozorovací důkaz tohoto rámce.

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

Koncepčně je termodynamické chování černých děr jedním z mála konkrétních vodítek ke kvantové gravitaci — místem, kde se viditelně setkávají gravitace, kvantová teorie a termodynamika. Zpřesnění toho, co přesně znamenají „entropie“ a „teplota“ u prudce se měnící černé díry, zpřesňuje také cíl, který musí zasáhnout jakákoli budoucí kvantová teorie. Neodpovídá na hlubokou otázku, čím entropie černé díry ve skutečnosti je. Formuluje ji však přesněji — a to je v této části fyziky většina práce.

Stručné shrnutí

Černé díry se řídí zákony připomínajícími termodynamiku, avšak úhledný „první zákon“ z roku 1973 pouze porovnával černé díry v klidové rovnováze a nedokázal popsat skutečný proces. Ashtekar, Paraizo a Shu rozšiřují první i druhý zákon na černé díry libovolně vzdálené od rovnováhy — slučující se, pohlcující hmotu nebo doznívající — pomocí lokálně definovaných „dynamických horizontů“ a zobrazení, které měnící se černé díře přiřadí okamžitou teplotu a rotaci. Výsledkem je, že plocha horizontu zůstává správnou mírou entropie i během násilných událostí. Jde o rigorózní výsledek v klasické obecné relativitě, nikoli o kvantovou gravitaci, pozorování, počítání mikrostavů ani řešení informačního paradoxu.

Kontrola bez příkras

Co článek ukazuje: Matematicky konzistentní rozšíření prvního a druhého zákona mechaniky černých děr na plně dynamické černé díry daleko od rovnováhy, založené na kvazilokálních dynamických horizontech. Definuje konečný první zákon založený na skutečném procesu a kvantitativní druhý zákon a činí přirozeným ztotožnění entropie dynamické černé díry s plochou jejího horizontu.

Co je skutečné, ale interpretační: Ztotožnění „entropie = plocha horizontu“ mimo rovnováhu. Nové zákony je činí přesvědčivým, ale přebírá standardní klasický předpoklad o vztahu plochy a entropie, místo aby jej odvozovalo.

Co článek neukazuje: Kvantovou teorii gravitace; mikroskopický původ nebo „počet“ entropie černé díry; řešení informačního paradoxu; jakýkoli pozorovací či experimentální výsledek; teplotu, kterou by bylo možné fyzicky změřit.

Hlavní omezení: Po celou dobu jde o klasickou obecnou relativitu; hlavní výsledky jsou dokázány pro běžný prostorupodobný, osově symetrický případ a obecnost je podpořena doprovodnou prací; ztotožnění plochy s entropií se předpokládá, nikoli odvozuje ze statistické mechaniky.

Jak velkou důvěru by měl mít běžný čtenář? Vysokou důvěru, že jde o solidní a uznávaný teoretický pokrok, který skutečně rozšiřuje termodynamiku černých děr do dynamického režimu. Stejně vysokou důvěru, že *nejde* o nové pozorování, kvantovou gravitaci ani vyřešení slavného informačního problému. Správný postoj: skutečný krok k porozumění, provedený křídou, nikoli dalekohledem.

Zdroje

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

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