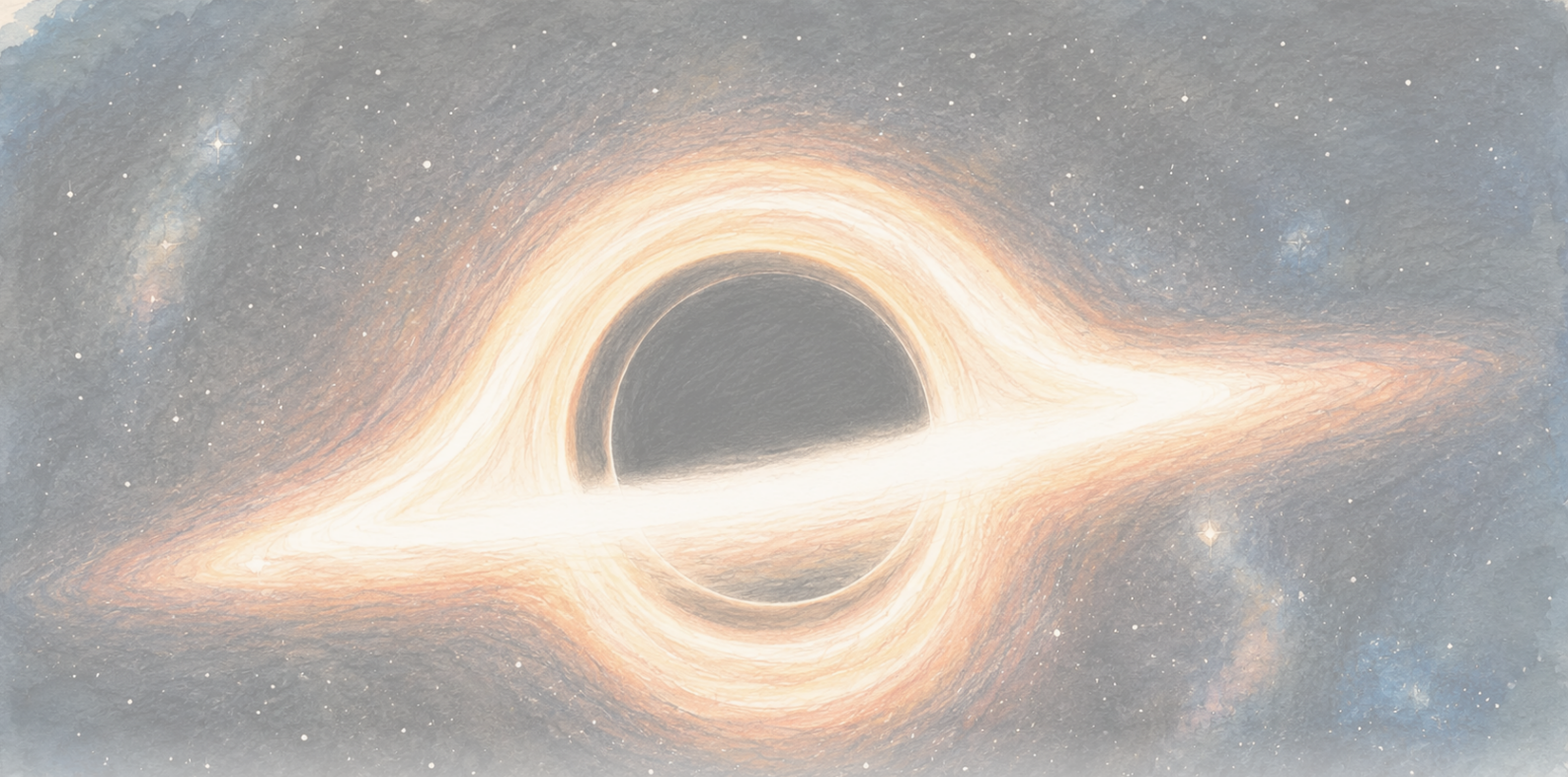




The CLEAN PAPER

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

Lubang hitam mematuhi 'hukum' termodinamik — hasil baharu meluaskannya kepada lubang hitam yang jauh daripada keseimbangan

Sejak 1970-an, lubang hitam diketahui mematuhi hukum yang menyerupai termodinamik, tetapi bentuk yang paling kemas hanya terpakai kepada lubang hitam pegun dalam keseimbangan. Kertas baharu di Physical Review Letters memperluas hukum pertama dan kedua kepada lubang hitam yang berubah dengan pantas — menelan bahan, bergabung atau memancarkan sinaran — menggunakan 'ufuk dinamik' yang boleh ditakrifkan secara setempat. Rangka kerja ini membolehkan ahli fizik menetapkan suhu dan entropi walaupun bagi lubang hitam yang jauh daripada keseimbangan. Ini ialah hasil matematik dalam relativiti umum klasik, bukan teori graviti kuantum baharu, bukan pemerhatian dan bukan penyelesaian kepada paradoks maklumat lubang hitam.

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

Lubang hitam mempunyai “hukum” yang menyerupai termodinamik. Versi yang kemas hanya berfungsi apabila tiada apa-apa sedang berlaku.

Salah satu fakta paling aneh dalam fizik adalah bahawa lubang hitam bertingkah laku seperti objek panas. Pada awal 1970-an, Bekenstein dan Hawking menyadari bahawa persamaan yang mengatur lubang hitam sejajar, terma demi terma, dengan hukum termodinamik: lubang hitam mempunyai entropi yang sebanding dengan luas horizonnya, dan suhu yang sebanding dengan graviti permukaannya. Hawking kemudian menunjukkan bahawa suhu itu nyata dalam makna paling mendalam — lubang hitam benar-benar memancarkan sinaran termal yang sangat redup.

Apa itu sinaran Hawking?

Secara klasik tiada yang dapat melepasi dari lubang hitam, jadi sepatutnya ia benar-benar hitam dan sama sekali tidak mempunyai suhu. Pada 1974 Stephen Hawking menunjukkan bahawa hal ini berubah ketika teori kuantum diperhitungkan di dekat ufuk: lubang hitam memancarkan cahaya termal yang sangat redup dan oleh itu perlahan-lahan kehilangan jisim, atau “menguap.” Spektrumnya bersifat termal pada suhu Hawking, sementara perambatan melalui ruang-masa melengkung mengubah sinaran yang mencapai tak hingga. Dalam gambaran heuristik yang umum — bukan penurunan Hawking yang sebenarnya — fluktuasi kuantum tepat di luar ufuk mewujudkan pasangan, dengan satu pasangan melepasi sebagai sinaran sementara yang lain jatuh ke dalam.

Ciri utamanya adalah suhu ini *berbanding terbalik* dengan jisim lubang hitam: semakin kecil lubangnya, semakin panas. Untuk lubang hitam apa-apa yang dapat dilihat teleskop, suhunya luar biasa rendah — jauh lebih sejuk daripada ruang kosong di sekitarnya — sehingga dalam praktik pancarannya dapat diabaikan dan belum pernah diukur secara langsung. Kepentingannya bersifat konseptual: sinaran Hawkinglah yang mengubah *analogi* antara mekanik lubang hitam dan termodinamik menjadi sesuatu yang benar-benar fizikal. Kerana lubang hitam benar-benar mempunyai suhu, “suhu” dan “entropi” dalam hukum-hukum ini adalah kuantiti termodinamik nyata, bukan kebetulan formal. (Ini adalah latar belakang untuk makalah ketika ini, bukan salah satu hasilnya.)

Korespondensi itu ditopang oleh hasil yang disebut **hukum pertama mekanik lubang hitam** (Bardeen, Carter, dan Hawking, 1973). Dalam kata-kata, hukum itu menyatakan: jika Anda menggeser sebuah lubang hitam daripada satu keadaan mantap ke keadaan mantap terdekat, perubahan jisimnya sama dengan suhu didarabkan perubahan entropi, ditambah terma yang berkaitan dengan putarannya. Ini adalah versi lubang hitam dari “panas yang masuk sama dengan suhu didarabkan perubahan entropi.”

Ada satu masalah yang tersembunyi di dalam frasa *keadaan mantap terdekat*. Hukum bersih tahun 1973 itu membandingkan dua lubang hitam yang sama-sama diam dalam keseimbangan, hanya berbeza secara infinitesimal. Ia tidak pernah benar-benar menggambarkan sebuah **proses** — lubang hitam menelan bintang, dua lubang hitam bergabung, atau lubang hitam yang baru lahir berdering

selepas kelahiran yang keras. Malah situasi-situasi itulah yang paling ingin kita pahami, dan kesemuanya kebalikan dari “diam tenang.” Hukum yang rapi itu menjadi bisu tepat ketika lubang hitam sedang menarik.

Mengapa pembaikan yang kelihatan jelas tidak berfungsi

Anda mungkin menyangka penyelesaiannya mudah: lihat sahaja ufuk membesar apabila bahan jatuh ke dalamnya. Masalahnya ialah *ufuk yang mana satu*.

Ufuk yang biasanya dibayangkan orang — **ufuk peristiwa**, titik tanpa jalan kembali yang sebenarnya — mempunyai sifat halus dan merepotkan: ia ditakrifkan oleh keseluruhan masa depan alam semesta. Untuk mengetahui di mana ufuk peristiwa berada *sekarang*, Anda perlu mengetahui segala sesuatu yang akan jatuh ke lubang hitam selamanya. Ini bukan sekadar masalah teknikal. Ufuk peristiwa dapat mulai tumbuh di kawasan ruang yang sepenuhnya kosong dan datar *sebelum* bahan yang akan memberinya makan tiba, hanya kerana bahan itu ditakdirkan tiba kemudian. Luasnya dapat bertambah di tempat yang secara setempat sama sekali tidak sedang berlaku apa-apa.

Bagaimana ufuk dapat tumbuh sebelum bahan tiba?

Nama saintifik untuk teka-teki ini adalah **sifat teleologis ufuk peristiwa**, yang juga disebut **definisi global**-nya. Di sini, “teleologis” bukan bermakna ufuk mempunyai tujuan, meramalkan masa depan, atau menghantar pengaruh ke belakang dalam masa. Ertinya, adakah sebuah peristiwa termasuk di dalam ufuk hanya dapat diputuskan dari sejarah masa depan ruang-masa secara lengkap.

Definisi formal menyatakan hal yang sama dengan lebih ringkas. Bayangkan **future null infinity** — disebut “I-plus” dan ditulis $\mathcal{I}^+$ — sebagai tujuan yang dicapai oleh cahaya yang melepasi selamanya menuju masa depan yang kosong dan tak berhingga jauhnya. Ufuk peristiwa adalah had antara peristiwa tempat isyarat cahaya ke luar akhirnya dapat mencapai tujuan itu dan peristiwa tempat tiada isyarat sedemikian yang *pernah* dapat mencapainya. Dalam notasi piawai relativiti umum, ia adalah had masa lalu sebab-akibat dari future null infinity: $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$. Kerana kata *pernah* tertanam dalam definisi itu, tiada pengukuran yang hanya dilakukan di sini dan sekarang yang dapat mendapati ufuk peristiwa secara tepat.

Sebuah cangkerang bola yang runtuh membuat keanehan ini kelihatan jelas. Sebelum cangkerang tiba, kawasan di dalamnya dapat kosong dan datar secara setempat. Kirim sinar cahaya ke luar dari pusat pada masa yang makin lambat: sinar yang lebih awal melepasi, sementara yang lebih lambat bertemu cangkerang yang runtuh dalam geometri yang tidak membolehkan mereka keluar. Ufuk peristiwa adalah had yang memisahkan kedua hasil itu. Jika ditelusuri mundur, had tersebut bermula di pusat dan mengembang melalui interior yang masih kosong dan datar sebelum cangkerang mencapainya. Pertambahan luasnya tidak melaporkan aliran bahan setempat apa-apa di sana; ia merekodkan laluan pelarian mana yang tetap terbuka dalam ruang-masa yang telah lengkap.

Tiada sesuatu pun dalam gambaran ini yang berfungsi mundur dalam masa. Jika cangkerang

dialihkan sehingga lubang hitam tidak terbentuk, ruang-masa lengkapnya akan berbeza dan kawasan sebelum ini tidak akan pernah menjadi bahagian ufuk peristiwa. Pelajarannya bukan bahawa masa depan mengubah masa lalu, melainkan bahawa ufuk peristiwa adalah **had sebab-akibat global**, bukan permukaan yang dapat dikesan pemerhati terdekat pada satu ketika. Inilah tepatnya mengapa ahli fizik menggunakan ufuk quasi-setempat atau dinamik ketika mereka ingin mengikuti lubang hitam yang berubah.

Sifat ini membuat ufuk peristiwa tidak berguna sebagai catatan berjalan tentang “keadaan” lubang hitam. Malah dalam simulasi komputer, Anda tidak dapat menentukan lokasinya sebelum simulasi selesai, apalagi menggunakannya untuk menjejak suhu atau entropi dari ketika ke ketika.

Langkah utama: ufuk yang boleh ditakrifkan secara setempat

Makalah baru oleh Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo, dan Jonathan Shu membina hasilnya di atas pengertian ufuk yang berbeza — ufuk **quasi-setempat**, yang ditakrifkan hanya oleh geometri di lingkungannya sendiri, tanpa merujuk ke masa depan tak berhingga. “Segmen ufuk dinamik” ini adalah permukaan yang telah digunakan relativis numerik untuk mendapati lubang hitam dalam simulasi penggabungan, malah kerana sifatnya setempat dan jujur: luasnya tumbuh hanya ketika tenaga benar-benar melintasinya.

Di atas asas itu, para penulis menyelesaikan separuh masalah yang lebih sukar. Dalam termodinamik biasa, sistem yang jauh dari keseimbangan terkenal sukar ditangani: Anda tidak dapat dengan bersih memberinya satu suhu atau tekanan, kerana kuantiti-kuantiti itu baru terdefinisi selepas keadaan tenang. Lubang hitam mengalami masalah yang sama — hingga, menurut para penulis, kita memanfaatkan ciri khusus relativiti umum. Lubang hitam yang *berada* dalam keseimbangan (sebuah lubang hitam Kerr) ditentukan hanya oleh dua angka: ukurannya dan putarannya. Maka para penulis membina sebuah pemetaan yang mengambil ufuk apa-apa yang berkembang liar dan jauh dari keseimbangan, lalu pada setiap ketika membaca dua angka milik lubang hitam keseimbangan yang paling menyerupainya ketika itu. Melalui pemetaan ini, lubang hitam yang berubah dengan keras tetap dapat diberi **suhu dan putaran yang bergantung pada masa**.

Dengan dua bahan tersebut — tenaga yang ditakrifkan secara setempat mengalir melintasi ufuk, dan kuantiti intensif sesaat — mereka memperluas hukum pertama ke lubang hitam yang arbitrer jauh dari keseimbangan. Yang penting, hukum baru ini menggambarkan **perubahan hingga yang disebabkan oleh proses fizikal nyata** (bahan dan gelombang graviti melintasi ufuk), bukan langkah infinitesimal antara dua keadaan beku. Mereka memasangkannya dengan hukum kedua yang sesuai dan kini bersifat *kuantitatif*: luas ufuk bertambah sebesar jumlah yang terikat langsung pada tenaga yang masuk. Jika digabungkan, hukum pertama dan kedua menunjuk pada satu kesimpulan bersih — malah ketika lubang hitam berada di tengah peristiwa paling keras yang dapat dibayangkan, saiz entropi yang tepat tetaplah luas horizonnya.

Apa yang *tidak* dibuktikan

- Kajian ini **tidak** menyelesaikan graviti kuantum. Ini adalah hasil dalam relativiti umum *klasik*, menggunakan pengenalpastian piawai antara luas ufuk dan entropi. Ia tidak menurunkan entropi itu dari sesuatu yang lebih fundamental.
- Kajian ini **tidak** mengira mikrostatus atau menerangkan *diperbuat daripada apa* entropi lubang hitam. Ia memperluas pembukuan termodinamik lubang hitam; ia tidak membuka kotaknya dan mendedahkan darjah kebebasan mikroskopik.
- Kajian ini **tidak** menyelesaikan paradoks maklumat lubang hitam. Teka-teki itu berada dalam teori kuantum; makalah ini tidak menyentuhnya.
- Ini **bukan** pemerhatian atau pengukuran. Tiada teleskop, data, atau isyarat gelombang graviti yang terlibat — ini matematik. “Suhu” lubang hitam yang sedang bergabung di sini adalah kuantiti yang ditakrifkan ketepatan dalam persamaan, bukan sesuatu yang dapat dibaca dengan termometer.
- Kajian ini **tidak** membatalkan Bekenstein dan Hawking. Ia *memperluas* gambaran mereka ke rejim dinamik di mana hukum asal yang hanya berlaku pada keseimbangan tidak lagi terpakai.

Sejauh mana kukuhnya bukti?

Kukuh bagi jenis hasil ini: karya fizik matematik yang teliti dan konsisten secara dalaman dari kumpulan terkemuka dalam bidangnya, diterbitkan sebagai *Editors’ Suggestion* di Physical Review Letters (makalah pengiring menghuraikan derivasi yang lebih panjang).

Catatan jujurnya menyangkut *jenis*, bukan kualiti:

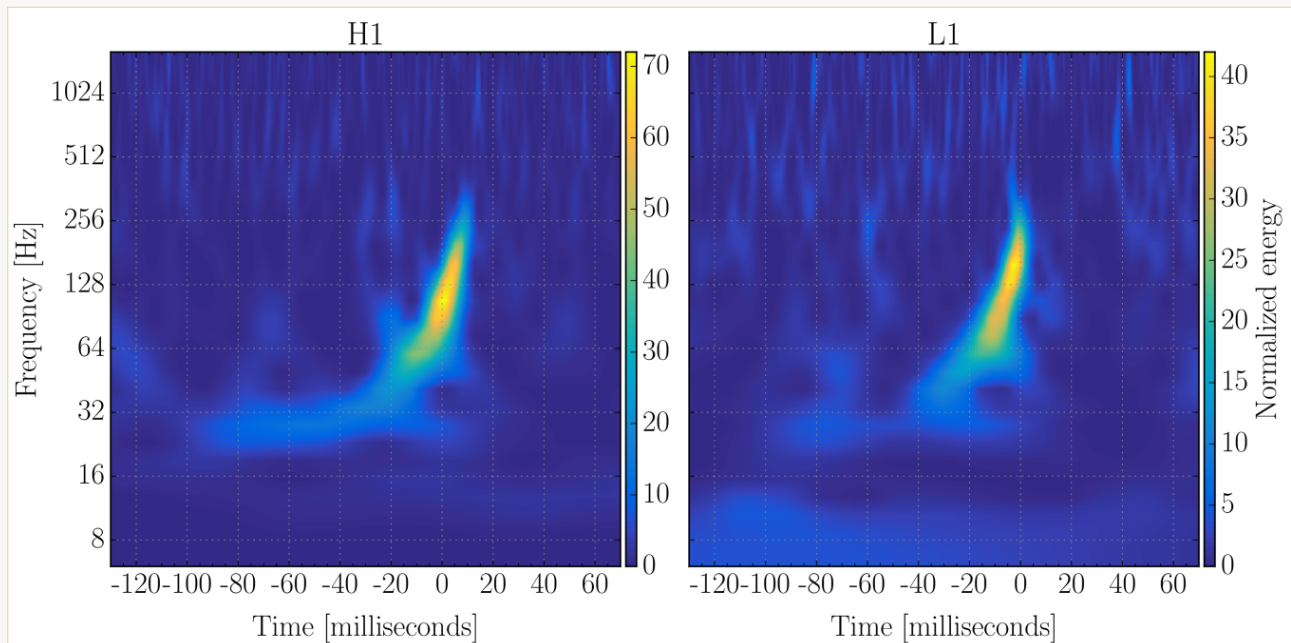
- Hasil ini bertumpu pada andaian konvensional bahawa luas ufuk *adalah* entropi (luas dibahagi empat kali pemalar Newton dan pemalar Planck). Jika pengenalpastian itu kelak direvisi oleh teori penuh graviti kuantum, interpretasinya juga akan ikut berubah.
- Pengiraan utama dikerjakan untuk kes yang paling umum (ufuk dinamik spacelike dan simetri aksial); para penulis berhujah bahawa pengehadan ini tidak esensial, tetapi pernyataan yang sepenuhnya umum bersandar pada hasil di tempat lain.
- “Entropi sama dengan luas ufuk, malah di luar keseimbangan” adalah *pengenalpastian* yang dibuat sangat semula jadi oleh hukum pertama dan kedua yang baru — bukan teorema yang diturunkan dari statistik mikroskopik.

Jadi: perluasan ketat terhadap rangka kerja berusia lima puluh tahun, bukan penemuan eksperimen dan bukan hukum fizik baru yang menunggu diuji.

Mengapa ini penting

Ada dua alasan, satu praktikal dan satu konseptual.

Secara praktikal, lubang hitam yang kini benar-benar kita pelajari — yang penggabungannya dikesan oleh LIGO dan Virgo — menghabiskan momen terpentingnya jauh dari keseimbangan. Kuantiti dalam kajian ini dibina dari ufuk yang ditakrifkan secara setempat, jenis ufuk yang telah dijejaki dalam simulasi, sehingga memberi cara berprinsip untuk membincangkan entropi dan suhu lubang hitam *semasa* penggabungan atau keruntuhan, bukan hanya sebelum dan selepas.



GW150914, isyarat gelombang graviti pertama yang dikesan secara langsung, berasal daripada dua lubang hitam yang bergabung. Peta masa-frekuensi ini menunjukkan isyarat di LIGO Hanford (kiri) dan LIGO Livingston (kanan): pada kedua detektor, jejak terang melengkung ke atas ketika frekuensi isyarat meningkat menuju penggabungan. Ini adalah contoh nyata sistem lubang hitam yang jauh dari keseimbangan; imej ini memberi konteks bagi rangka kerja termodinamik baru, bukan bukti pemerhatian untuk rangka kerja tersebut.

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

Secara konseptual, tingkah laku termodinamik lubang hitam adalah salah satu daripada sedikit petunjuk konkrit yang kita miliki tentang graviti kuantum — tempat graviti, teori kuantum, dan termodinamik kelihatan bertemu. Memperjelas dengan tepat apa makna “entropi” dan “suhu” bagi lubang hitam yang sedang berubah keras mempersempit sasaran yang perlu dicapai teori kuantum masa depan. Ini tidak menjawab persoalan mendalam tentang apa sebenarnya entropi lubang hitam. Ia menyatakan persoalan itu dengan lebih ketepatan — yang, di sudut fizik ini, merupakan sebahagian besar pekerjaan.

Ringkasan utama

Lubang hitam mematuhi hukum yang mencerminkan termodinamik, tetapi “hukum pertama” tahun 1973 yang paling rapi hanya membandingkan lubang hitam yang diam dalam keseimbangan dan tidak dapat menggambarkan sebuah proses nyata. Ashtekar, Paraizo, dan Shu memperluas hukum pertama dan kedua ke lubang hitam yang arbitrer jauh dari keseimbangan — sedang

bergabung, makan bahan, atau mereda selepas gangguan — dengan menggunakan “ufuk dinamik” yang ditakrifkan secara setempat dan pemetaan yang memberi lubang hitam yang berubah suhu dan putaran sesaat. Hasilnya, luas ufuk tetap merupakan saiz entropi yang tepat malah selama peristiwa keras. Ini adalah hasil ketat dalam relativiti umum klasik, bukan graviti kuantum, bukan pemerhatian, bukan kiraan mikrostatus, dan bukan penyelesaian paradoks maklumat.

Semakan tanpa sensasi

Apa yang ditunjukkan makalah: Perluasan yang konsisten secara matematik terhadap hukum pertama dan kedua mekanik lubang hitam untuk lubang hitam yang sepenuhnya dinamik dan jauh dari keseimbangan, dibina di atas ufuk dinamik quasi-setempat. Makalah mendefinisikan hukum pertama yang hingga dan berasaskan proses serta hukum kedua kuantitatif, dan membuat pengenalanpastian entropi lubang hitam dinamik dengan luas horizonnya menjadi semula jadi.

Apa yang nyata tetapi bersifat interpretatif: Pengenalanpastian “entropi = luas ufuk” di luar keseimbangan. Hukum baru membuatnya sangat meyakinkan tetapi tetap mewarisi andaian kawasan-entropi klasik piawai bukannya menurunkannya.

Apa yang tidak ditunjukkannya: Teori graviti kuantum; asal mikroskopik atau “kiraan” entropi lubang hitam; penyelesaian paradoks maklumat; hasil pemerhatian atau eksperimen apa-apa; suhu yang dapat Anda ukur secara fizikal.

Had utama: Seluruhnya relativiti umum klasik; hasil utama dibuktikan untuk kes umum spacelike dan simetri aksial, dengan generalitas diperdebatkan melalui pekerjaan pengiring; pengenalanpastian kawasan-entropi diandaikan, bukan dibuktikan dari mekanik statistik.

Sejauh mana pembaca umum patut yakin? Tinggi bahawa ini merupakan kemajuan teoretikal yang solid dan dihormati, yang benar-benar memperluas termodinamik lubang hitam ke rejim dinamik. Sama tingginya bahawa ini *bukan* dakwaan pemerhatian baru, bukan graviti kuantum, dan bukan penyelesaian paradoks maklumat yang terkenal. Sikap yang tepat: langkah nyata dalam pemahaman, dibuat dengan kapur tulis dan bukan teleskop.

Sumber

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

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