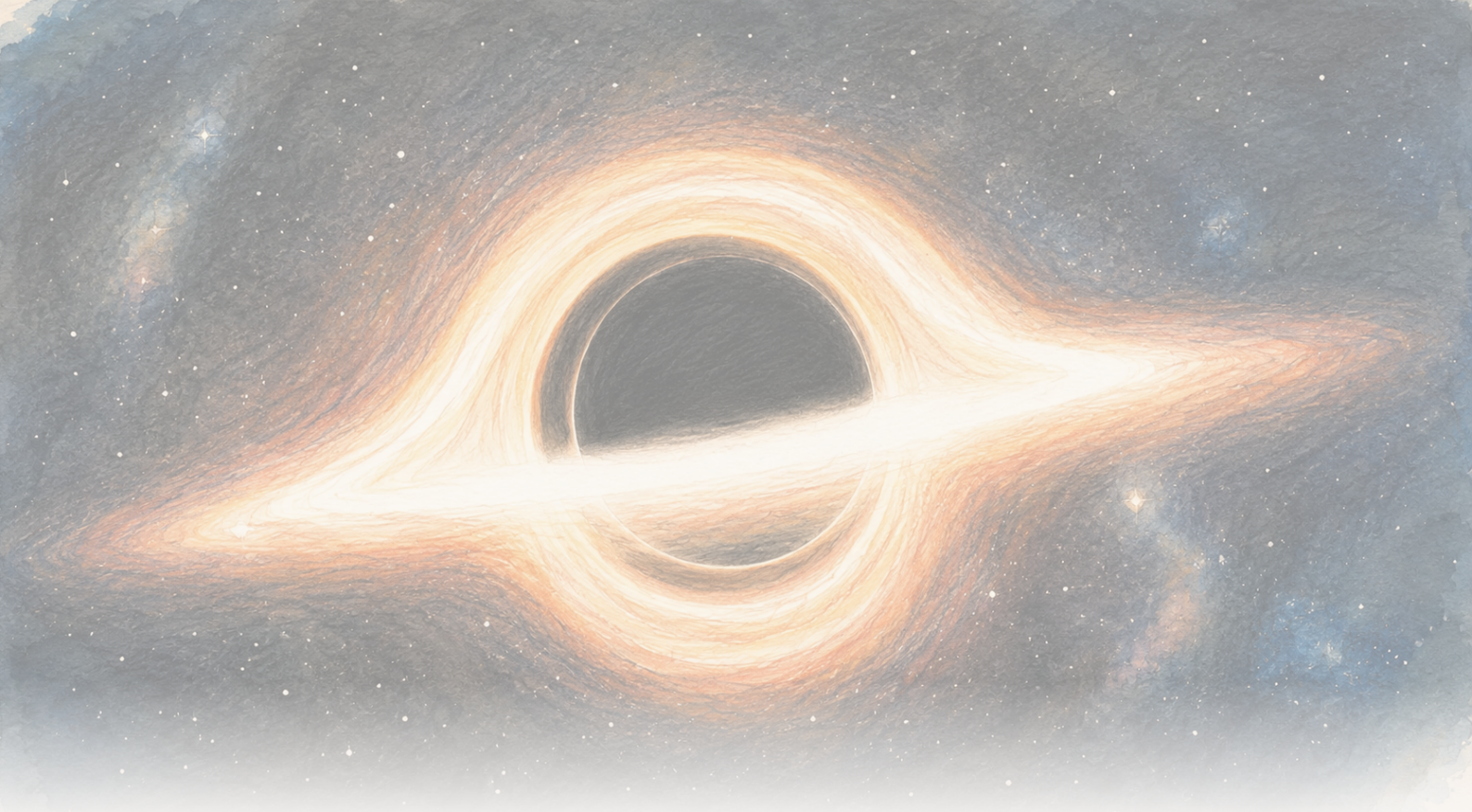




The CLEAN PAPER

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

Lubang hitam mematuhi 'hukum' termodinamika — hasil baru memperluasnya ke lubang hitam yang sangat jauh dari kesetimbangan

Sejak 1970-an, lubang hitam diketahui mematuhi hukum yang mencerminkan termodinamika, tetapi versi paling bersih hanya berlaku untuk lubang hitam yang diam dalam kesetimbangan. Sebuah makalah baru di Physical Review Letters memperluas hukum pertama dan kedua ke lubang hitam yang berubah cepat — menelan materi, bergabung, memancarkan radiasi — dengan menggunakan 'horizon dinamis' yang didefinisikan secara lokal. Kerangka ini memungkinkan fisikawan menetapkan suhu dan entropi bahkan bagi lubang hitam yang berkembang sangat keras. Ini adalah hasil matematika dalam relativitas umum klasik, bukan gravitasi kuantum baru, bukan observasi, dan bukan penyelesaian teka-teki informasi 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 memiliki “hukum” yang mirip termodinamika. Versi yang rapi hanya bekerja ketika tidak ada yang sedang terjadi.

Salah satu fakta paling aneh dalam fisika adalah bahwa lubang hitam berperilaku seperti benda panas. Pada awal 1970-an, Bekenstein dan Hawking menyadari bahwa persamaan yang mengatur lubang hitam sejajar, suku demi suku, dengan hukum termodinamika: lubang hitam memiliki entropi yang sebanding dengan luas horizonnya, dan suhu yang sebanding dengan gravitasi permukaannya. Hawking kemudian menunjukkan bahwa suhu itu nyata dalam arti paling mendalam — lubang hitam benar-benar memancarkan radiasi termal yang sangat redup.

Apa itu radiasi Hawking?

Secara klasik tidak ada yang dapat lolos dari lubang hitam, jadi seharusnya ia benar-benar hitam dan sama sekali tidak memiliki suhu. Pada 1974 Stephen Hawking menunjukkan bahwa hal ini berubah ketika teori kuantum diperhitungkan di dekat horizon: lubang hitam memancarkan cahaya termal yang sangat redup dan karena itu perlahan kehilangan massa, atau “menguap.” Spektrumnya bersifat termal pada suhu Hawking, sementara perambatan melalui ruang-waktu melengkung mengubah radiasi yang mencapai tak hingga. Dalam gambaran heuristik yang umum — bukan penurunan Hawking yang sebenarnya — fluktuasi kuantum tepat di luar horizon menciptakan pasangan, dengan satu pasangan lolos sebagai radiasi sementara yang lain jatuh ke dalam.

Ciri utamanya adalah suhu ini *berbanding terbalik* dengan massa lubang hitam: semakin kecil lubangnya, semakin panas. Untuk lubang hitam apa pun yang dapat dilihat teleskop, suhunya luar biasa rendah — jauh lebih dingin daripada ruang kosong di sekitarnya — sehingga dalam praktik pancarannya dapat diabaikan dan belum pernah diukur secara langsung. Kepentingannya bersifat konseptual: radiasi Hawkinglah yang mengubah *analogi* antara mekanika lubang hitam dan termodinamika menjadi sesuatu yang benar-benar fisik. Karena lubang hitam benar-benar memiliki suhu, “suhu” dan “entropi” dalam hukum-hukum ini adalah besaran termodinamika nyata, bukan kebetulan formal. (Ini adalah latar belakang untuk makalah saat ini, bukan salah satu hasilnya.)

Korespondensi itu ditopang oleh hasil yang disebut **hukum pertama mekanika lubang hitam** (Bardeen, Carter, dan Hawking, 1973). Dalam kata-kata, hukum itu mengatakan: jika Anda menggeser sebuah lubang hitam dari satu keadaan mantap ke keadaan mantap terdekat, perubahan massanya sama dengan suhu dikalikan perubahan entropi, ditambah suku yang berkaitan dengan putarannya. Ini adalah versi lubang hitam dari “panas yang masuk sama dengan suhu dikalikan 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 kesetimbangan, hanya berbeda secara infinitesimal. Ia tidak pernah benar-benar menggambarkan sebuah **proses** — lubang hitam menelan bintang, dua lubang hitam bergabung, atau lubang hitam yang baru lahir berder-

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

Mengapa perbaikan yang tampak jelas tidak bekerja

Anda mungkin berpikir solusinya mudah: cukup amati horizon membesar ketika materi jatuh masuk. Masalahnya adalah *horizon yang mana*.

Horizon yang biasanya dibayangkan orang — **horizon peristiwa**, titik tanpa jalan kembali yang sebenarnya — memiliki sifat halus dan merepotkan: ia didefinisikan oleh seluruh masa depan alam semesta. Untuk mengetahui di mana horizon peristiwa berada *sekarang*, Anda harus mengetahui segala sesuatu yang akan jatuh ke lubang hitam selamanya. Ini bukan sekadar masalah teknis. Horizon peristiwa dapat mulai tumbuh di wilayah ruang yang sepenuhnya kosong dan datar *sebelum* materi yang akan memberinya makan tiba, hanya karena materi itu ditakdirkan tiba kemudian. Luasnya dapat bertambah di tempat yang secara lokal sama sekali tidak sedang terjadi apa-apa.

Bagaimana horizon dapat tumbuh sebelum materi tiba?

Nama ilmiah untuk teka-teki ini adalah **sifat teleologis horizon peristiwa**, yang juga disebut **definisi global**-nya. Di sini, “teleologis” bukan berarti horizon memiliki tujuan, meramalkan masa depan, atau mengirim pengaruh ke belakang dalam waktu. Artinya, apakah sebuah peristiwa termasuk di dalam horizon hanya dapat diputuskan dari sejarah masa depan ruang-waktu 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 lolos selamanya menuju masa depan yang kosong dan tak berhingga jauhnya. Horizon peristiwa adalah batas antara peristiwa tempat sinyal cahaya ke luar akhirnya dapat mencapai tujuan itu dan peristiwa tempat tidak ada sinyal demikian yang *pernah* dapat mencapainya. Dalam notasi standar relativitas umum, ia adalah batas masa lalu kausal dari future null infinity: $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$. Karena kata *pernah* tertanam dalam definisi itu, tidak ada pengukuran yang hanya dilakukan di sini dan sekarang yang dapat menemukan horizon peristiwa secara tepat.

Sebuah cangkang bola yang runtuh membuat keanehan ini terlihat jelas. Sebelum cangkang tiba, wilayah di dalamnya dapat kosong dan datar secara lokal. Kirim sinar cahaya ke luar dari pusat pada waktu yang makin lambat: sinar yang lebih awal lolos, sementara yang lebih lambat bertemu cangkang yang runtuh dalam geometri yang tidak memungkinkan mereka keluar. Horizon peristiwa adalah batas yang memisahkan kedua hasil itu. Jika ditelusuri mundur, batas tersebut bermula di pusat dan mengembang melalui interior yang masih kosong dan datar sebelum cangkang mencapainya. Pertambahan luasnya tidak melaporkan aliran materi lokal apa pun di sana; ia merekam jalur pelarian mana yang tetap terbuka dalam ruang-waktu yang telah lengkap.

Tidak ada sesuatu pun dalam gambaran ini yang bekerja mundur dalam waktu. Jika cangkang

dialihkan sehingga lubang hitam tidak terbentuk, ruang-waktu lengkapnya akan berbeda dan wilayah sebelumnya tidak akan pernah menjadi bagian horizon peristiwa. Pelajarannya bukan bahwa masa depan mengubah masa lalu, melainkan bahwa horizon peristiwa adalah **batas kausal global**, bukan permukaan yang dapat dideteksi pengamat terdekat pada satu saat. Inilah tepatnya mengapa fisikawan menggunakan horizon quasi-lokal atau dinamis ketika mereka ingin mengikuti lubang hitam yang berubah.

Sifat ini membuat horizon peristiwa tidak berguna sebagai catatan berjalan mengenai “keadaan” lubang hitam. Bahkan dalam simulasi komputer, Anda tidak dapat menentukan lokasinya sebelum simulasi selesai, apalagi menggunakannya untuk melacak suhu atau entropi dari saat ke saat.

Langkah kuncinya: horizon yang dapat didefinisikan secara lokal

Makalah baru oleh Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo, dan Jonathan Shu membangun hasilnya di atas pengertian horizon yang berbeda — horizon **quasi-lokal**, yang didefinisikan hanya oleh geometri di lingkungannya sendiri, tanpa merujuk ke masa depan tak berhingga. “Segmen horizon dinamis” ini adalah permukaan yang sudah digunakan relativis numerik untuk menemukan lubang hitam dalam simulasi merger, justru karena sifatnya lokal dan jujur: luasnya tumbuh hanya ketika energi benar-benar melintasinya.

Di atas fondasi itu, para penulis menyelesaikan separuh masalah yang lebih sulit. Dalam termodinamika biasa, sistem yang jauh dari kesetimbangan terkenal sulit ditangani: Anda tidak dapat dengan bersih memberinya satu suhu atau tekanan, karena besaran-besaran itu baru terdefinisi setelah keadaan tenang. Lubang hitam mengalami masalah yang sama — sampai, menurut para penulis, kita memanfaatkan ciri khusus relativitas umum. Lubang hitam yang *berada* dalam kesetimbangan (sebuah lubang hitam Kerr) ditentukan hanya oleh dua angka: ukurannya dan putarannya. Maka para penulis membangun sebuah pemetaan yang mengambil horizon apa pun yang berkembang liar dan jauh dari kesetimbangan, lalu pada setiap saat membaca dua angka milik lubang hitam kesetimbangan yang paling menyerupainya saat itu. Melalui pemetaan ini, lubang hitam yang berubah dengan keras tetap dapat diberi **suhu dan putaran yang bergantung pada waktu**.

Dengan dua bahan tersebut — energi yang didefinisikan secara lokal mengalir melintasi horizon, dan besaran intensif sesaat — mereka memperluas hukum pertama ke lubang hitam yang arbitrer jauh dari kesetimbangan. Yang penting, hukum baru ini menggambarkan **perubahan hingga yang disebabkan oleh proses fisik nyata** (materi dan gelombang gravitasi melintasi horizon), bukan langkah infinitesimal antara dua keadaan beku. Mereka memasangkannya dengan hukum kedua yang sesuai dan kini bersifat *kuantitatif*: luas horizon bertambah sebesar jumlah yang terikat langsung pada energi yang masuk. Jika digabungkan, hukum pertama dan kedua menunjuk pada satu kesimpulan bersih — bahkan ketika lubang hitam berada di tengah peristiwa paling keras yang dapat dibayangkan, ukuran entropi yang tepat tetaplah luas horizonnya.

Apa yang *tidak* dibuktikan

- Penelitian ini **tidak** menyelesaikan gravitasi kuantum. Ini adalah hasil dalam relativitas umum *klasik*, menggunakan identifikasi standar antara luas horizon dan entropi. Ia tidak menurunkan entropi itu dari sesuatu yang lebih fundamental.
- Penelitian ini **tidak** menghitung mikrostatus atau menjelaskan *terbuat dari apa* entropi lubang hitam. Ia memperluas pembukuan termodinamika lubang hitam; ia tidak membuka kotaknya dan mengungkap derajat kebebasan mikroskopis.
- Penelitian ini **tidak** menyelesaikan paradoks informasi lubang hitam. Teka-teki itu berada dalam teori kuantum; makalah ini tidak menyentuhnya.
- Ini **bukan** pengamatan atau pengukuran. Tidak ada teleskop, data, atau sinyal gelombang gravitasi yang terlibat — ini matematika. “Suhu” lubang hitam yang sedang bergabung di sini adalah besaran yang didefinisikan presisi dalam persamaan, bukan sesuatu yang dapat dibaca dengan termometer.
- Penelitian ini **tidak** membatalkan Bekenstein dan Hawking. Ia *memperluas* gambaran mereka ke rezim dinamis tempat hukum asli yang hanya berlaku pada kesetimbangan tidak dapat berbicara.

Seberapa kuat buktinya?

Kuat, untuk jenis hasil yang sebenarnya: karya fisika matematika yang teliti dan konsisten secara internal dari kelompok terkemuka di bidangnya, diterbitkan sebagai *Editors’ Suggestion* di Physical Review Letters (sebuah makalah pendamping mengerjakan penurunan yang lebih panjang).

Catatan jujurinya menyangkut *jenis*, bukan kualitas:

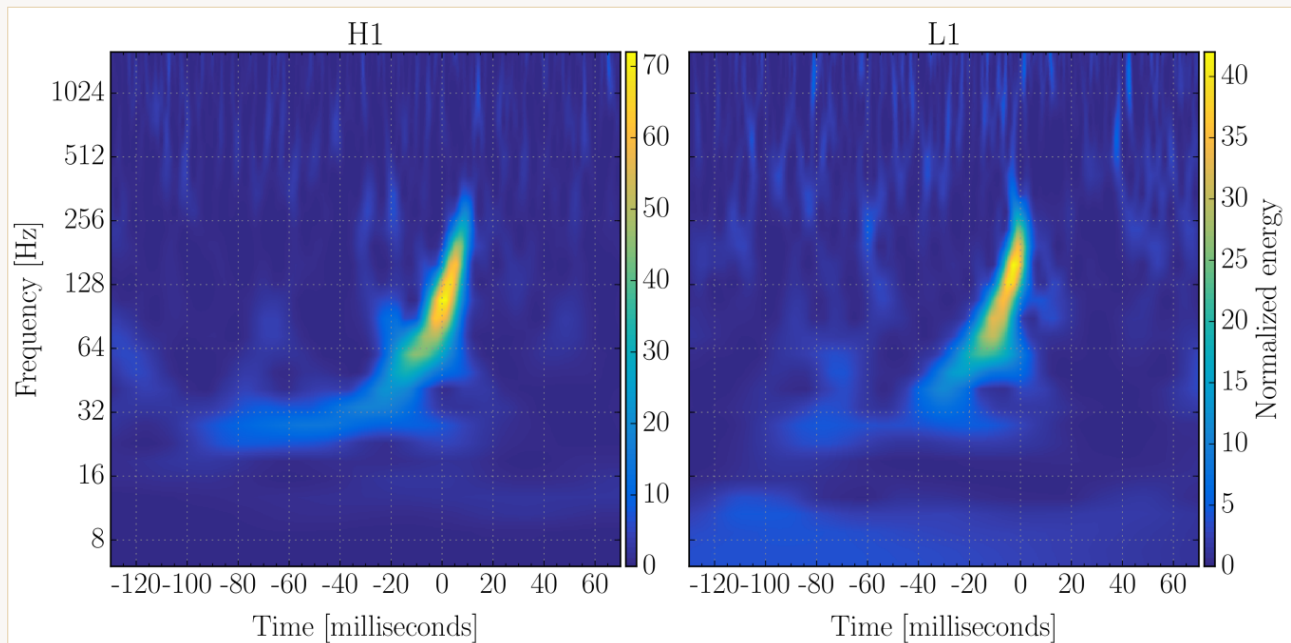
- Hasil ini bertumpu pada asumsi konvensional bahwa luas horizon *adalah* entropi (luas dibagi empat kali konstanta Newton dan konstanta Planck). Jika identifikasi itu kelak direvisi oleh teori penuh gravitasi kuantum, interpretasinya juga akan ikut berubah.
- Perhitungan utama dikerjakan untuk kasus yang paling umum (horizon dinamis spacelike dan simetri aksial); para penulis berargumen bahwa pembatasan ini tidak esensial, tetapi pernyataan yang sepenuhnya umum bersandar pada hasil di tempat lain.
- “Entropi sama dengan luas horizon, bahkan di luar kesetimbangan” adalah *identifikasi* yang dibuat sangat alami oleh hukum pertama dan kedua yang baru — bukan teorema yang diturunkan dari statistik mikroskopis.

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

Mengapa ini penting

Ada dua alasan, satu praktis dan satu konseptual.

Secara praktis, lubang hitam yang kini benar-benar kita pelajari — yang mergernya didengar LIGO dan Virgo — menghabiskan momen terpentingnya jauh dari kesetimbangan. Besaran dalam makalah ini dibangun dari horizon yang didefinisikan secara lokal, jenis horizon yang sudah dilacak simulasi, sehingga memberi cara berprinsip untuk berbicara tentang entropi dan suhu lubang hitam *selama* merger atau keruntuhan, bukan hanya sebelum dan sesudah.



GW150914, sinyal gelombang gravitasi pertama yang dideteksi secara langsung, berasal dari dua lubang hitam yang bergabung. Peta waktu-frekuensi ini menunjukkan sinyal di LIGO Hanford (kiri) dan LIGO Livingston (kanan): pada kedua detektor, jejak terang melengkung ke atas ketika frekuensi sinyal meningkat menuju merger. Ini adalah contoh nyata sistem lubang hitam yang jauh dari kesetimbangan; gambar ini memberi konteks bagi kerangka termodinamika baru, bukan bukti observasional untuk kerangka tersebut.

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

Secara konseptual, perilaku termodinamika lubang hitam adalah salah satu dari sedikit petunjuk konkret yang kita miliki tentang gravitasi kuantum — tempat gravitasi, teori kuantum, dan termodinamika terlihat bertemu. Memperjelas dengan tepat apa arti “entropi” dan “suhu” bagi lubang hitam yang sedang berubah keras mempersempit sasaran yang harus dicapai teori kuantum masa depan. Ini tidak menjawab pertanyaan mendalam tentang apa sebenarnya entropi lubang hitam. Ia menyatakan pertanyaan itu dengan lebih presisi — yang, di sudut fisika ini, merupakan sebagian besar pekerjaan.

Singkatnya

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

bergabung, makan materi, atau mereda setelah gangguan — dengan menggunakan “horizon dinamis” yang didefinisikan secara lokal dan pemetaan yang memberi lubang hitam yang berubah suhu dan putaran sesaat. Hasilnya, luas horizon tetap merupakan ukuran entropi yang tepat bahkan selama peristiwa keras. Ini adalah hasil ketat dalam relativitas umum klasik, bukan gravitasi kuantum, bukan pengamatan, bukan hitungan mikrostatis, dan bukan solusi paradoks informasi.

Penilaian tanpa berlebihan

Apa yang ditunjukkan makalah: Perluasan yang konsisten secara matematis terhadap hukum pertama dan kedua mekanika lubang hitam untuk lubang hitam yang sepenuhnya dinamis dan jauh dari kesetimbangan, dibangun di atas horizon dinamis quasi-lokal. Makalah mendefinisikan hukum pertama yang hingga dan berbasis proses serta hukum kedua kuantitatif, dan membuat identifikasi entropi lubang hitam dinamis dengan luas horizonnya menjadi alami.

Apa yang nyata tetapi bersifat interpretatif: Identifikasi “entropi = luas horizon” di luar kesetimbangan. Hukum baru membuatnya sangat meyakinkan tetapi tetap mewarisi asumsi area-entropi klasik standar alih-alih menurunkannya.

Apa yang tidak ditunjukkannya: Teori gravitasi kuantum; asal mikroskopis atau “hitungan” entropi lubang hitam; penyelesaian paradoks informasi; hasil observasional atau eksperimental apa pun; suhu yang dapat Anda ukur secara fisik.

Keterbatasan utama: Seluruhnya relativitas umum klasik; hasil utama dibuktikan untuk kasus umum spacelike dan simetri aksial, dengan generalitas diperdebatkan melalui pekerjaan pendamping; identifikasi area-entropi diasumsikan, bukan dibuktikan dari mekanika statistik.

Seberapa besar keyakinan yang layak dimiliki pembaca umum? Tinggi bahwa ini merupakan kemajuan teoretis yang solid dan dihormati, yang benar-benar memperluas termodinamika lubang hitam ke rezim dinamis. Sama tingginya bahwa ini *bukan* klaim observasi baru, bukan gravitasi kuantum, dan bukan penyelesaian teka-teki informasi 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>