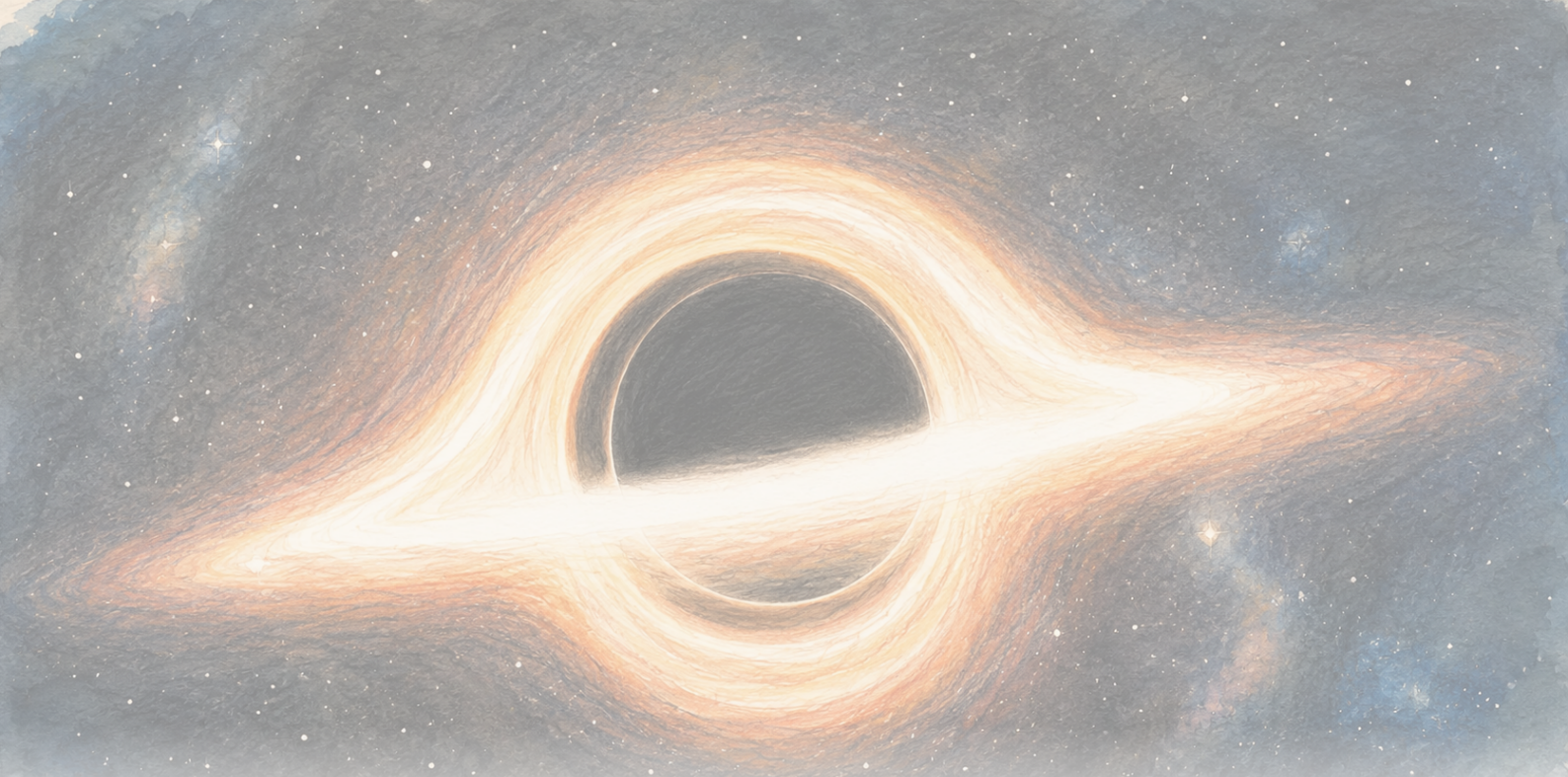




The CLEAN PAPER

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 mencerminkan termodinamik, tetapi versi yang paling kemas hanya terpakai kepada lubang hitam yang pegun dalam keseimbangan. Makalah baharu dalam *Physical Review Letters* memperluas hukum pertama dan kedua kepada bahagian ufuk kuasi-setempat yang memenuhi syarat sebagai segmen ufuk dinamik dan boleh berada sejauh mana pun daripada keseimbangan — semasa akresi, keruntuhan dan kebanyakan peringkat penggabungan lubang hitam. Simulasi menjejaki ufuk kuasi-setempat sepanjang penggabungan, tetapi hukum itu belum meliputi selang singkat di sekitar penyatuan apabila ufuk tersebut bukan segmen ufuk dinamik. Rangka kerja teras berada dalam relativiti umum, dengan penerapan semiklasik pada penyejatan; ia bukan graviti kuantum baharu, pemerhatian atau penyelesaian kepada teka-teki 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 baharu oleh Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo dan Jonathan Shu mengasaskan hasilnya pada gagasan ufuk yang berbeza — ufuk **kuasi-setempat**, yang ditakrifkan hanya oleh geometri di kawasan sekitarnya sendiri, tanpa merujuk kepada masa depan yang tidak terhingga. **Ufuk kuasi-setempat** ini ialah permukaan yang sudah digunakan oleh ahli relativiti berangka untuk menentukan kedudukan lubang hitam asal, menjejaki penggabungan dan menentukan kedudukan sisa gabungan sepanjang simulasi. Hukum termodinamik yang dibangunkan di sini terpakai pada bahagian ufuk kuasi-setempat yang memenuhi syarat tambahan untuk menjadi **segmen ufuk dinamik**. Pada setiap segmen tersebut, luas berubah sebagai tindak balas langsung terhadap fluks tenaga setempat, bukannya terhadap peristiwa pada masa depan yang jauh: luas itu bertambah di bawah aliran masuk positif dan, bagi ufuk bak-masa yang menyejat dengan fluks tenaga negatif, berkurang.

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 jelas 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 pemetaan yang mengambil setiap keadaan sepanjang segmen ufuk dinamik dan, pada setiap keratan rentas segmen itu, membaca dua angka milik lubang hitam keseimbangan yang menyerupai keadaan tersebut pada ketika itu. Melalui pemetaan ini, lubang hitam yang berubah dengan keras dapat diberi **suhu dan putaran yang bergantung pada masa** sepanjang segmen.

Dengan unsur-unsur tersebut — tenaga yang ditakrifkan secara setempat dan mengalir merentasi ufuk, serta kuantiti intensif sesaat — mereka memperluas hukum pertama kepada lubang hitam yang berada sejauh mana pun daripada keseimbangan. Yang penting, hukum baharu itu menerangkan **perubahan terhingga yang disebabkan oleh proses fizikal sebenar** (jirim dan gelombang graviti yang merentasi ufuk), bukannya langkah infinitesimal antara dua keadaan beku. Mereka menggand-

ingkannya dengan hukum kedua yang sepadan, yang kini dinyatakan secara *kuantitatif*: perubahan luas ufuk berkait secara langsung dengan fluks tenaga setempat — pertambahan di bawah aliran masuk positif, atau pengurangan bagi ufuk bak-masa yang menyejat di bawah fluks negatif. Jika digabungkan, hukum pertama dan kedua membawa kepada satu kesimpulan yang jelas — bagi mana-mana fasa yang diwakili oleh segmen ufuk dinamik, betapa ganas sekalipun, ukuran entropi yang tepat tetap luas ufuknya.

Apa yang *tidak* dibuktikan

- Ia **tidak** menyelesaikan graviti kuantum. Rangka kerja teras dirumuskan dalam relativiti umum; penerapannya pada penyejatan lubang hitam menggunakan penghampiran semiklasik, dengan medan jirim kuantum bertindak pada ruang-masa klasik. Ia masih mengandaikan pengenaltian piawai luas ufuk dengan entropi, dan bukannya menerbitkan entropi itu daripada sesuatu yang lebih asasi.
- 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.
- Ia **bukan** pemerhatian atau pengukuran. Tiada teleskop, data atau isyarat gelombang graviti yang terlibat — ini ialah matematik. “Suhu” yang diberikan kepada ufuk dinamik ketika lubang hitam berevolusi ialah kuantiti yang ditakrifkan dengan tepat dalam persamaan, bukannya sesuatu yang boleh dibaca pada termometer.
- Ia **belum** memberikan penerangan termodinamik berterusan bagi seluruh proses penyatuan dua lubang hitam. Simulasi berangka menjejaki ufuk kuasi-setempat sepanjang seluruh evolusi — daripada lubang hitam asal, melalui penggabungan, hingga sisa gabungan — tetapi dalam satu selang singkat yang amat hampir dengan penggabungan, ufuk itu gagal memenuhi syarat yang diperlukan bagi segmen ufuk dinamik. Makalah pengiring menyatakan bahawa huraian termodinamik bagi selang itu masih sedang diusahakan.
- 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, dalam konteks jenis hasil ini: karya fizik matematik yang teliti dan tekal secara dalaman daripada kumpulan terkemuka dalam bidang tersebut, diterbitkan sebagai *Editors’ Suggestion* dalam Physical Review Letters. Sebuah makalah pengiring yang ditelaah seawat memberikan derivasi yang lebih panjang dan membincangkan kes-kes yang diringkaskan daripada Letter itu.

Catatan jujurnya menyangkut *jenis*, bukan kualiti:

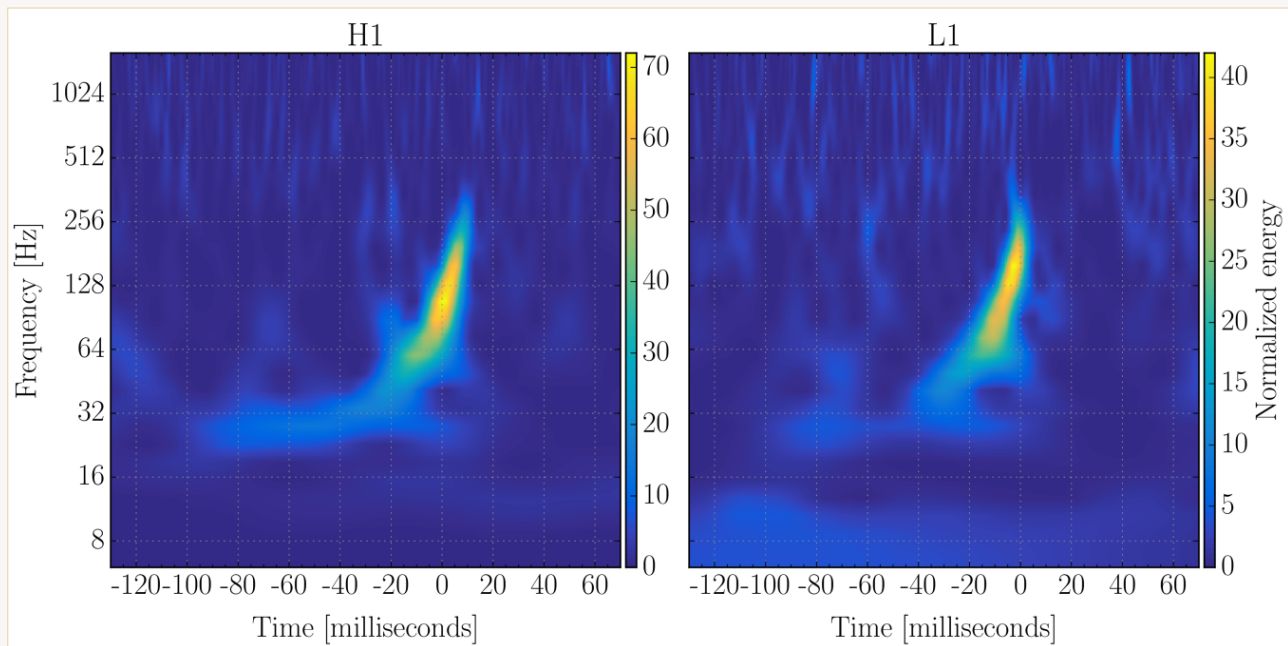
- Hasil ini bertumpu pada andaian konvensional bahawa luas ufuk *adalah* entropi (luas dibahagi empat kali pemalar Newton dan pemalar Planck). Jika pengenalpastian itu kelak direvisi oleh teori penuh graviti kuantum, interpretasinya juga akan ikut berubah.
- Demi keringkasan dan kesederhanaan, Letter yang pendek itu membentangkan derivasi utama menggunakan ufuk dinamik bak-ruang yang bersimetri paksi. Makalah pengiring yang ditelaah sejawat menganalisis secara eksplisit ufuk dinamik bak-masa dan membina momentum sudut tanpa medan Killing putaran. Namun, bagi ufuk bak-masa yang menyejat, pengolahan eksplisit terhadap tindak balas balik terhadap kepada simetri sfera.
- “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 kaji — lubang hitam yang penggabungannya ‘didengar’ oleh LIGO dan Virgo — melalui saat-saat terpentingnya jauh daripada keseimbangan. Simulasi menjejaki ufuk kuasi-setempat daripada lubang hitam asal, melalui penggabungan, hingga sisa gabungan. Kuantiti dalam makalah ini terpakai pada bahagian ufuk tersebut yang memenuhi syarat sebagai segmen ufuk dinamik, lalu memberikan kaedah berprinsip untuk membincangkan entropi dan suhu lubang hitam sepanjang kebanyakan peringkat evolusi penggabungan dan ketika keruntuhan, bukan hanya setelah segala-galanya kembali mantap. Dalam selang singkat tepat di sekitar penyatuan, ufuk kuasi-setempat terus dijejaki tetapi berada di luar penerangan termodinamik semasa.



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’ 1973 yang kemas hanya membandingkan lubang hitam yang pegun dalam keseimbangan dan tidak dapat menerangkan proses sebenar. Ashtekar, Paraizo dan Shu memperluas hukum pertama dan kedua kepada lubang hitam yang berada sejauh mana pun daripada keseimbangan — menerima jirim, runtuh, mereda dan melalui kebanyakan peringkat penggabungan — dengan menggunakan ufuk kuasi-setempat, menerapkan hukum termodinamik pada segmen ufuk dinamik dan membina pemetaan yang memberikan suhu dan putaran sesaat kepada setiap keadaan sepanjang segmen tersebut. Kesimpulannya, luas ufuk kekal sebagai ukuran entropi yang tepat bagi setiap fasa yang diwakili oleh segmen ufuk dinamik. Selang singkat yang amat hampir dengan penyatuan belum diliputi oleh penerangan termodinamik itu, walaupun simulasi terus menjejaki ufuk kuasi-setempat.

Rangka kerja teras berada dalam relativiti umum, dengan penerapan semiklasik pada penyejatan; ia bukan graviti kuantum, pemerhatian, pengiraan mikrostatus atau penyelesaian kepada 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 kuasi-setempat dan bahagian-bahagiannya yang memenuhi syarat untuk menjadi segmen ufuk dinamik. Makalah mendefinisikan hukum pertama yang hingga dan berasaskan proses serta hukum kedua kuantitatif, dan menjadikan pengenalpastian entropi lubang hitam dinamik dengan luas ufuknya sesuatu yang semula jadi.

Apa yang nyata tetapi bersifat interpretatif: Pengenalpastian “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: Derivasi teras dibuat dalam relativiti umum, manakala penerapan penyejatan bak-masa menggunakan penghampiran semiklasik; selang singkat yang amat hampir dengan penyatuan binari tidak diwakili oleh segmen ufuk dinamik dan penerangan termodinamikanya masih sedang diusahakan, walaupun simulasi berangka terus menjejaki ufuk kuasi-setempat; pengolahan eksplisit tindak balas balik bagi ufuk bak-masa yang menyejat terhad kepada simetri sfera; pengenalpastian luas dengan entropi diandaikan, bukannya dibuktikan daripada 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.

Kemas kini selepas penerbitan

• Pembetulan • 2026-08-27

Berikutan maklum balas daripada penulis koresponden Abhay Ashtekar, kami membetulkan dua kenyataan yang sebelum ini menyifatkan kes bak-masa dan tidak bersimetri paksi sebagai hanya diujahkan, dan bukannya dibincangkan secara eksplisit dalam makalah pengiring yang ditelaah sejawat. Dalam semakan itu, kami turut menjelaskan bahawa rangka kerja tersebut belum meliputi selang singkat yang amat hampir dengan penyatuan binari, apabila ufuk kuasi-setempat gagal memenuhi syarat bagi segmen ufuk dinamik.

- **Pembetulan · 2026-08-28**

Selepas penjelasan lanjut daripada penulis koresponden Abhay Ashtekar, kami membezakan ufuk kuasi-setempat, yang dijejaki simulasi berangka daripada lubang hitam asal melalui penggabungan hingga sisa gabungan, daripada bahagian-bahagiannya yang memenuhi syarat tambahan untuk menjadi segmen ufuk dinamik, tempat hukum termodinamik terpakai.

Sumber

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>