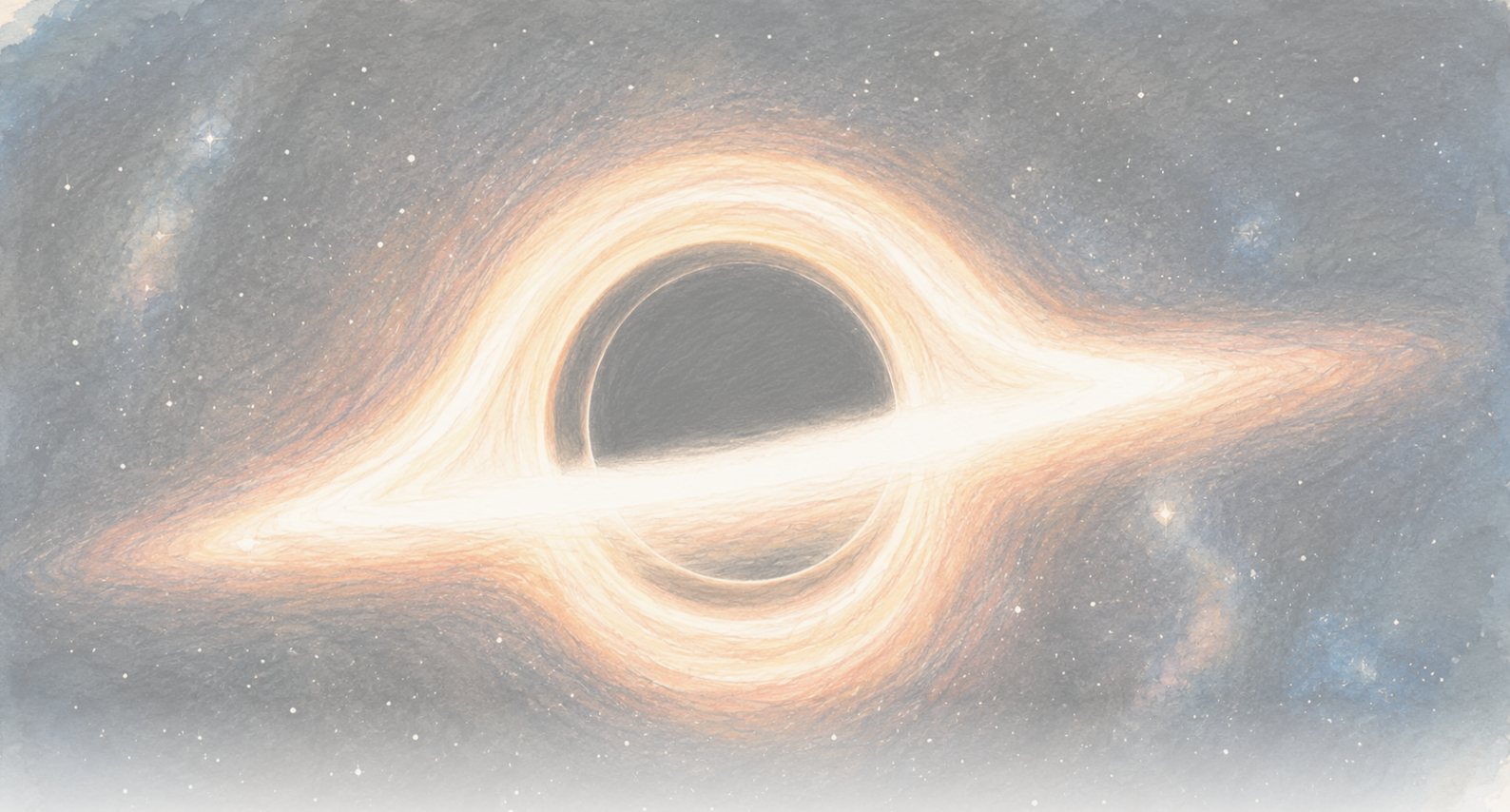




The CLEAN PAPER

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

Hố đen tuân theo các ‘định luật’ nhiệt động lực học — một kết quả mới mở rộng chúng sang những hố đen dữ dội xa cân bằng

Từ những năm 1970, người ta đã biết hố đen tuân theo các định luật phản chiếu nhiệt động lực học, nhưng phiên bản sạch nhất chỉ áp dụng cho hố đen nằm yên ở cân bằng. Một bài báo mới trên Physical Review Letters mở rộng định luật thứ nhất và thứ hai sang các hố đen đang thay đổi nhanh — nuốt vật chất, sáp nhập, phát xạ — bằng cách dùng ‘chân trời động’ được định nghĩa cục bộ. Khung này cho phép gán nhiệt độ và entropy ngay cả cho một hố đen tiến hóa dữ dội. Đây là kết quả toán học trong thuyết tương đối rộng cổ điển, không phải hấp dẫn lượng tử mới, không phải quan sát và không giải bài toán thông tin hố đen.

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

Hố đen có những “định luật” trông như nhiệt động lực học. Phiên bản gọn gàng trước đây chỉ hoạt động khi chẳng có gì xảy ra

Một trong những sự thật kỳ lạ nhất của vật lý là hố đen hành xử giống vật nóng. Đầu những năm 1970, Bekenstein và Hawking nhận ra các phương trình chi phối hố đen khớp từng hạng với các định luật nhiệt động lực học: hố đen có entropy tỷ lệ với diện tích chân trời và nhiệt độ tỷ lệ với gia tốc bề mặt. Sau đó Hawking cho thấy nhiệt độ này là “thật” theo nghĩa sâu nhất — hố đen thực sự phát sáng, dù cực kỳ yếu, bằng bức xạ nhiệt.

Bức xạ Hawking là gì?

Theo vật lý cổ điển, không gì thoát khỏi hố đen, nên nó lẽ ra phải hoàn toàn đen và không có nhiệt độ. Năm 1974, Stephen Hawking cho thấy điều này thay đổi khi tính đến lý thuyết lượng tử gần chân trời: hố đen phát ra một ánh sáng nhiệt rất yếu và vì thế từ từ mất khối lượng, hay “bay hơi”. Phổ phát xạ có tính nhiệt ở nhiệt độ Hawking, trong khi quá trình lan truyền qua không-thời gian cong làm biến đổi bức xạ tới vô cực. Trong một hình dung trực giác phổ biến — không phải phép suy diễn thực sự của Hawking — dao động lượng tử ngay bên ngoài chân trời tạo ra các cặp, trong đó một thành viên thoát đi thành bức xạ còn thành viên kia rơi vào.

Điểm then chốt là nhiệt độ này *tỷ lệ nghịch* với khối lượng hố đen: hố càng nhỏ thì càng nóng. Với mọi hố đen mà kính thiên văn có thể quan sát, nhiệt độ thấp đến mức phi thường — lạnh hơn rất nhiều so với không gian trống xung quanh — nên trên thực tế ánh sáng này hoàn toàn không đáng kể và chưa từng được đo trực tiếp. Tầm quan trọng của nó là về ý niệm: bức xạ Hawking biến *phép tương tự* giữa cơ học hố đen và nhiệt động lực học thành một điều vật lý thực sự. Vì hố đen thật sự có nhiệt độ, “nhiệt độ” và “entropy” trong các định luật này là các đại lượng nhiệt động lực học thật, không phải sự trùng hợp hình thức. (Đây là bối cảnh cho bài báo hiện tại, không phải kết quả của nó.)

Sự tương ứng đó được neo bởi một kết quả gọi là **định luật thứ nhất của cơ học hố đen** (Bardeen, Carter và Hawking, 1973). Nói bằng lời, nó bảo rằng: nếu bạn đẩy nhẹ một hố đen từ một trạng thái ổn định sang một trạng thái ổn định gần đó, thay đổi khối lượng của nó bằng nhiệt độ nhân với thay đổi entropy, cộng thêm một hạng cho spin. Đây là phiên bản hố đen của “nhiệt đi vào bằng nhiệt độ nhân thay đổi entropy”.

Nhưng có một cái bẫy nằm trong cụm *trạng thái ổn định gần đó*. Định luật sạch đẹp năm 1973 so sánh hai hố đen đang yên tĩnh ở cân bằng, chỉ khác nhau vô cùng nhỏ. Nó chưa bao giờ thật sự mô tả một **quá trình** — hố đen nuốt một ngôi sao, hai hố đen sáp nhập, hay một hố đen mới sinh rung tắt sau một quá trình hình thành dữ dội. Đó lại chính là những tình huống chúng ta muốn hiểu nhất, và chúng trái ngược hoàn toàn với “ngồi yên”. Định luật gọn gàng im tiếng đúng lúc hố đen trở nên thú vị.

Vì sao cách sửa hiển nhiên không hoạt động

Bạn có thể nghĩ cách sửa rất đơn giản: chỉ cần theo dõi chân trời lớn lên khi vật chất rơi vào. Vấn đề là *chân trời nào*.

Chân trời mà đa số mọi người hình dung — **chân trời sự kiện**, điểm không quay lại thực sự — có một tính chất tinh tế và bất tiện: nó được định nghĩa bởi toàn bộ tương lai của vũ trụ. Muốn biết chân trời sự kiện nằm ở đâu *ngay bây giờ*, bạn phải biết mọi thứ sẽ rơi vào hố đen trong tương lai, mãi mãi. Đây không phải tiêu tiết kỹ thuật. Chân trời sự kiện có thể bắt đầu lớn lên trong một vùng không gian hoàn toàn trống và phẳng *trước khi* vật chất sẽ nuôi nó tới nơi, đơn giản vì vật chất đó định mệnh sẽ rơi vào sau này. Diện tích của nó có thể tăng ở một nơi mà xét cục bộ chẳng có gì đang xảy ra.

Làm sao chân trời có thể lớn lên trước khi vật chất tới?

Tên khoa học của câu đố này là **tính mục đích luận của chân trời sự kiện**, cũng thường được gọi là **định nghĩa toàn cục** của nó. Ở đây “mục đích luận” không có nghĩa chân trời có mục đích, dự đoán tương lai hay gửi ảnh hưởng ngược thời gian. Nó có nghĩa việc một sự kiện nằm bên trong chân trời hay không chỉ có thể được quyết định từ toàn bộ lịch sử tương lai của không-thời gian.

Định nghĩa hình thức nói điều tương tự ngắn gọn hơn. Hãy hình dung **vô cực null tương lai** — gọi là “I-plus” và viết $\mathcal{I}^+$ — như đích đến của ánh sáng thoát mãi ra một tương lai trống và xa vô hạn. Chân trời sự kiện là biên giữa các sự kiện mà từ đó một tín hiệu ánh sáng đi ra cuối cùng có thể tới đích đó và các sự kiện mà từ đó không tín hiệu nào có thể tới được. Trong ký hiệu chuẩn của thuyết tương đối rộng, đó là biên của quá khứ nhân quả của vô cực null tương lai: $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$. Vì chữ *bao giờ* đã nằm trong định nghĩa, không phép đo nào chỉ thực hiện ở đây và lúc này có thể định vị chính xác chân trời sự kiện. Một vỏ cầu sụp đổ làm điều kỳ lạ này dễ thấy. Trước khi vỏ tới, vùng bên trong có thể trống và phẳng cục bộ. Gửi các tia sáng đi ra từ tâm ở những thời điểm ngày càng muộn: các tia sớm thoát được, còn các tia muộn gặp vỏ đang sụp trong một hình học khiến chúng không thoát ra. Chân trời sự kiện là biên phân cách hai kết cục đó. Nếu lần ngược về quá khứ, biên này bắt đầu ở tâm rồi mở rộng qua vùng bên trong vẫn trống và phẳng trước khi vỏ tới. Diện tích tăng của nó không báo một dòng vật chất cục bộ nào ở đó; nó ghi lại các lối thoát nào vẫn còn mở trong không-thời gian hoàn chỉnh.

Không có gì trong bức tranh này tác động ngược thời gian. Nếu vỏ bị chuyển hướng và không hình thành hố đen, không-thời gian hoàn chỉnh sẽ khác và vùng trước đó cũng không phải một phần của chân trời sự kiện. Bài học không phải tương lai thay đổi quá khứ, mà là chân trời sự kiện là một **biên nhân quả toàn cục**, không phải bề mặt mà quan sát viên gần đó có thể phát hiện tại một thời điểm. Chính vì vậy các nhà vật lý dùng chân trời cận cục bộ hoặc chân trời động khi cần theo dõi một hố đen đang thay đổi.

Điều này khiến chân trời sự kiện vô dụng như một bản ghi chạy theo thời gian về “trạng thái” của hố đen. Bạn thậm chí không thể xác định nó trong mô phỏng máy tính cho tới khi mô phỏng kết thúc, càng không thể dùng nó để theo dõi nhiệt độ hay entropy từng khoảnh khắc.

Bước chuyển: một chân trời có thể định nghĩa cục bộ

Bài báo mới của Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo và Jonathan Shu xây kết quả trên một khái niệm chân trời khác — một chân trời **cận cục bộ**, chỉ được định nghĩa bởi hình học trong vùng lân cận, không cần tham chiếu tới tương lai vô hạn. Các “đoạn chân trời động” này là chính những bề mặt mà các nhà tương đối số đã dùng để tìm hố đen trong mô phỏng sáp nhập, vì chúng cục bộ và trung thực: diện tích của chúng chỉ tăng ở nơi năng lượng thực sự đi qua.

Trên nền đó, các tác giả giải quyết nửa khó hơn của vấn đề. Trong nhiệt động lực học thông thường, một hệ xa cân bằng rất khó gán một nhiệt độ hoặc áp suất duy nhất, vì các đại lượng đó chỉ được định nghĩa sạch khi hệ lắng xuống. Hố đen cũng gặp vấn đề như vậy — cho đến khi, theo các tác giả, ta tận dụng một đặc điểm riêng của thuyết tương đối rộng. Một hố đen ở cân bằng (một hố đen Kerr) được xác định chỉ bởi hai con số: kích thước và spin. Vì vậy các tác giả xây một ánh xạ nhận một chân trời đang tiến hóa dữ dội, xa cân bằng, rồi tại mỗi thời điểm đọc ra hai con số của hố đen cân bằng mà nó tạm thời giống nhất. Qua ánh xạ này, ngay cả hố đen thay đổi mãnh liệt cũng có thể được gán một **nhiệt độ và spin phụ thuộc thời gian**.

Với hai mảnh đó — năng lượng được định nghĩa cục bộ đang đi qua chân trời, và các đại lượng cường độ tức thời — họ mở rộng định luật thứ nhất sang hố đen xa cân bằng tùy ý. Quan trọng nhất, định luật mới mô tả **thay đổi hữu hạn do các quá trình vật lý thật** gây ra (vật chất và sóng hấp dẫn đi qua chân trời), chứ không phải những bước vô cùng nhỏ giữa hai trạng thái đóng băng. Họ ghép nó với một định luật thứ hai tương ứng, giờ mang tính *định lượng*: diện tích chân trời tăng một lượng gần trực tiếp với năng lượng đã chảy vào. Ghép định luật thứ nhất và thứ hai lại dẫn tới một kết luận sạch — ngay cả khi hố đen đang ở giữa một sự kiện dữ dội nhất có thể tưởng tượng, thước đo entropy đúng vẫn là diện tích chân trời của nó.

Điều nghiên cứu này *không* chứng minh

- Nó **không** giải hấp dẫn lượng tử. Đây là kết quả trong *thuyết tương đối rộng cổ điển*, dùng cách đồng nhất chuẩn giữa diện tích chân trời và entropy. Nó không suy ra entropy đó từ một cấu trúc cơ bản hơn.
- Nó **không** đếm vi trạng thái hay giải thích entropy của hố đen *được tạo từ cái gì*. Nó mở rộng sổ sách nhiệt động lực học hố đen; không mở hộp để lộ các bậc tự do vi mô.
- Nó **không** giải nghịch lý thông tin hố đen. Câu đố đó nằm trong lý thuyết lượng tử; bài báo này không chạm tới.
- Đây **không** phải quan sát hay phép đo. Không kính thiên văn, không dữ liệu, không tín hiệu sóng hấp dẫn nào được dùng — đây là toán học. “Nhiệt độ” của một hố đen đang sáp nhập ở đây là đại lượng được định nghĩa chính xác trong phương trình, không phải thứ có thể đọc bằng nhiệt kế.
- Nó **không** lật đổ Bekenstein và Hawking. Nó *mở rộng* bức tranh của họ vào chế độ động nơi định luật ban đầu chỉ áp dụng cân bằng không nói được gì.

Bằng chứng mạnh đến đâu?

Mạnh đối với loại kết quả này: một công trình vật lý toán học cẩn thận, nhất quán nội tại từ một nhóm hàng đầu trong lĩnh vực, được xuất bản dưới dạng *Editors' Suggestion* trên Physical Review Letters (một bài đồng hành trình bày các suy diễn dài hơn).

Những lưu ý trung thực nằm ở *loại* bằng chứng chứ không phải chất lượng:

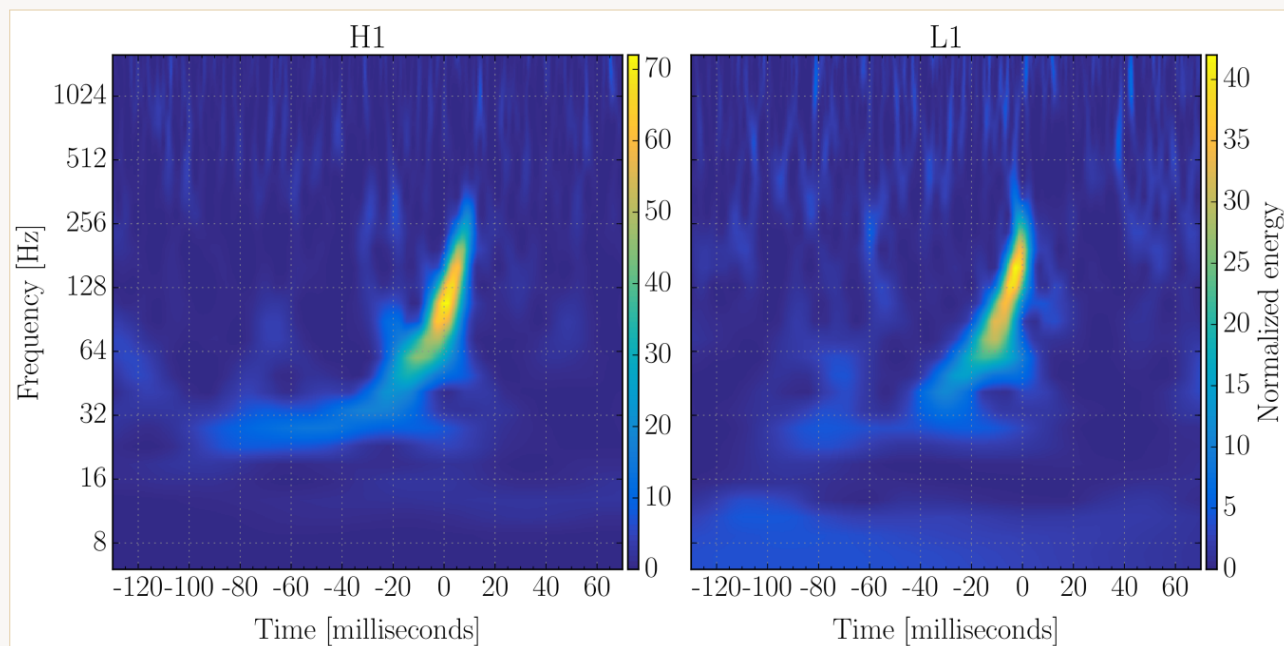
- Nó dựa trên giả định chuẩn rằng diện tích chân trời là entropy (diện tích chia cho bốn lần hằng số Newton và hằng số Planck). Nếu một lý thuyết hấp dẫn lượng tử đầy đủ về sau sửa cách đồng nhất đó, diễn giải cũng sẽ thay đổi theo.
- Các phép tính tiêu biểu được thực hiện cho trường hợp phổ biến nhất (chân trời động dạng spacelike, đối xứng trục); các tác giả lập luận các hạn chế này không cốt yếu, nhưng phát biểu hoàn toàn tổng quát dựa vào các kết quả ở nơi khác.
- “Entropy bằng diện tích chân trời, kể cả ngoài cân bằng” là một *đồng nhất* thuyết phục được các định luật thứ nhất và thứ hai mới làm tự nhiên — không phải định lý suy từ thống kê vi mô.

Vì vậy: một mở rộng chặt chẽ của khung năm mươi năm tuổi, không phải khám phá thực nghiệm và cũng không phải một định luật tự nhiên mới đang chờ được kiểm tra.

Vì sao nó quan trọng

Có hai lý do, một thực dụng và một ý niệm.

Về thực dụng, những hố đen mà chúng ta thực sự nghiên cứu hiện nay — các hệ mà LIGO và Virgo nghe thấy đang sáp nhập — trải qua những khoảnh khắc quan trọng nhất khi xa cân bằng. Các đại lượng trong bài báo được xây từ cùng loại chân trời định nghĩa cục bộ mà mô phỏng vốn đã theo dõi, nên chúng cho một cách có nguyên tắc để nói về entropy và nhiệt độ của hố đen *trong lúc* sáp nhập hay sụp đổ, không chỉ trước và sau.



GW150914, tín hiệu sóng hấp dẫn đầu tiên được phát hiện trực tiếp, đến từ hai hố đen đang sáp nhập. Các bản đồ thời gian–tần số này cho thấy tín hiệu trong LIGO Hanford (trái) và LIGO Livingston (phải): ở cả hai máy dò, vệt sáng quét lên trên khi tần số tăng về phía thời điểm sáp nhập. Đây là ví dụ thật về một hệ hố đen xa cân bằng; nó là bối cảnh cho khung nhiệt động lực học mới, không phải bằng chứng quan sát cho khung đó.

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

Về ý niệm, hành vi nhiệt động lực học của hố đen là một trong số ít manh mối cụ thể chúng ta có về hấp dẫn lượng tử — nơi hấp dẫn, lý thuyết lượng tử và nhiệt động lực học gặp nhau rõ ràng. Làm sắc nét chính xác “entropy” và “nhiệt độ” nghĩa là gì với một hố đen thay đổi dữ dội sẽ siết chặt mục tiêu mà bất kỳ lý thuyết lượng tử tương lai nào phải đạt tới. Nó không trả lời câu hỏi sâu về entropy hố đen thực sự là gì. Nó đặt câu hỏi chính xác hơn — và ở góc vật lý này, đó đã là phần lớn công việc.

Tóm tắt gọn

Hố đen tuân theo các định luật phản chiếu nhiệt động lực học, nhưng “định luật thứ nhất” gọn gàng năm 1973 chỉ so sánh các hố đen đứng yên ở cân bằng và không mô tả được một quá trình thật. Ashtekar, Paraizo và Shu mở rộng cả định luật thứ nhất và thứ hai sang hố đen xa cân bằng tùy ý — đang sáp nhập, nuốt vật chất, rung tắt — bằng cách dùng các “chân trời động” được định nghĩa cục bộ và một ánh xạ gán cho hố đen đang thay đổi một nhiệt độ và spin tức thời. Kết quả là diện tích chân trời vẫn là thước đo entropy phù hợp ngay trong các sự kiện dữ dội. Đây là kết quả chặt chẽ trong thuyết tương đối rộng cổ điển, không phải hấp dẫn lượng tử, không phải quan sát, không phải đếm vi trạng thái và không phải lời giải nghịch lý thông tin.

Đánh giá thăng thẩn

Bài báo cho thấy gì: Một mở rộng nhất quán về toán học của định luật thứ nhất và thứ hai của cơ học hố đen sang các hố đen hoàn toàn động, xa cân bằng, được xây trên chân trời động cận cục bộ. Nó định nghĩa một định luật thứ nhất hữu hạn dựa trên quá trình và một định luật thứ hai định lượng, đồng thời làm tự nhiên việc đồng nhất entropy của hố đen động với diện tích chân trời.

Điều có cơ sở nhưng vẫn là diễn giải: Đồng nhất “entropy = diện tích chân trời” ngoài cân bằng. Các định luật mới làm điều đó rất thuyết phục, nhưng nó thừa hưởng giả định diện tích–entropy cổ điển chuẩn chứ không suy ra từ vi mô.

Điều nó không cho thấy: Một lý thuyết hấp dẫn lượng tử; nguồn gốc vi mô hay phép “đếm” entropy hố đen; lời giải nghịch lý thông tin; bất kỳ kết quả quan sát hoặc thực nghiệm nào; một nhiệt độ có thể đo vật lý bằng nhiệt kế.

Hạn chế chính: Toàn bộ trong thuyết tương đối rộng cổ điển; kết quả tiêu biểu được chứng minh cho trường hợp spacelike, đối xứng trục phổ biến với tính tổng quát được lập luận qua công trình đồng hành; đồng nhất diện tích–entropy được giả định, không chứng minh từ cơ học thống kê.

Một độc giả phổ thông nên tin cậy đến mức nào? Có thể tin cao rằng đây là một tiến bộ lý thuyết chắc chắn, được đánh giá cao và thực sự mở rộng nhiệt động lực học hố đen sang chế độ động. Đồng thời cũng nên tin cao rằng đây *không* phải tuyên bố về quan sát mới, không phải hấp dẫn lượng tử và không giải câu đố thông tin nổi tiếng. Cách nhìn đúng: một bước tiến thật trong hiểu biết, được thực hiện bằng phấn viết chứ không bằng kính thiên văn.

Nguồn

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

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