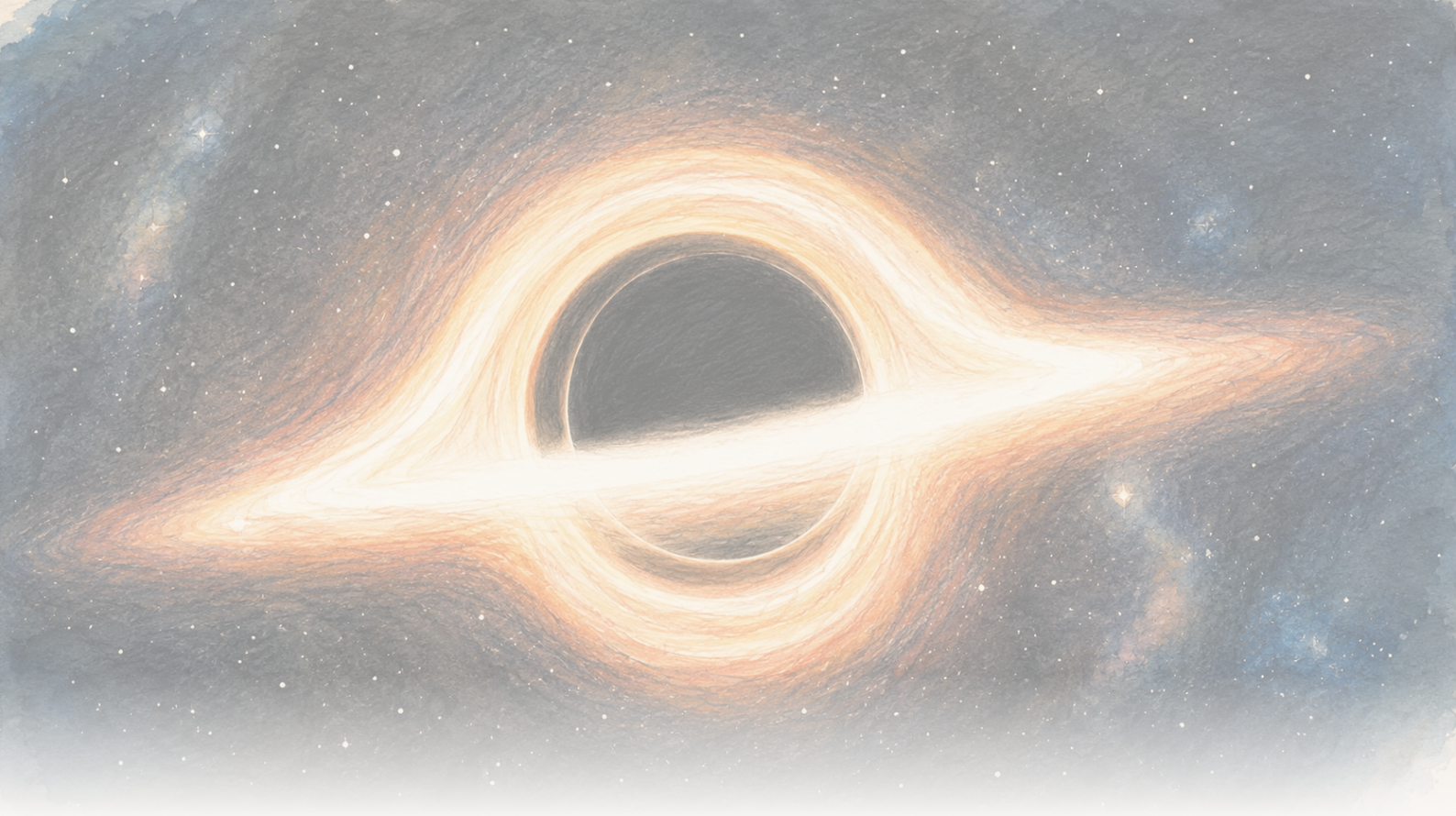




The CLEAN PAPER

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

ブラックホールは熱力学の「法則」に従う — 新しい結果が激しい非平衡状態まで拡張

1970年代からブラックホールには熱力学と対応する法則があると知られてきたが、最も整った形は静かな平衡状態にしか適用できなかった。*Physical Review Letters* の新論文は、局所的に定義できる「力学的地平線」を使い、物質を飲み込む、合体する、放射するなど急速に変化するブラックホールへ第一・第二法則を拡張した。激しく進化するブラックホールにも温度とエントロピーを割り当てられる。これは古典的一般相対論の数学的結果であり、新しい量子重力でも観測でもなく、ブラックホール情報問題の解決でもない。

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

ブラックホールには熱力学そっくりの「法則」がある。ただし整った版は、何も起きていないときにしか使えなかった

物理学でも特に奇妙な事実の一つは、ブラックホールが熱い物体のように振る舞うことだ。1970 年代初め、Bekenstein と Hawking は、ブラックホールを支配する方程式が熱力学の法則と項ごとに対応することに気づいた。ブラックホールは地平線面積に比例するエントロピーをもち、表面重力に比例する温度をもつ。さらに Hawking は、その温度が最も深い意味で本物だと示した。ブラックホールは実際に、ごく弱い熱放射で光る。

Hawking 放射とは？

古典論ではブラックホールから何も脱出できないので、本来なら完全に黒く、温度もゼロであるはずだ。1974 年、Stephen Hawking は地平線近傍で量子論を考慮すると事情が変わることを示した。ブラックホールは弱い熱的な光を放ち、そのためゆっくり質量を失い「蒸発」する。スペクトルは Hawking 温度に対応する熱的なものだが、曲がった時空を伝播する過程で、無限遠へ届く放射は修正される。よく使われる直感的な説明——Hawking の実際の導出ではない——では、地平線直外の量子ゆらぎが粒子対を作り、一方が放射として逃げ、もう一方が落ち込むと描く。

重要なのは、この温度がブラックホール質量に反比例することだ。小さいブラックホールほど熱い。望遠鏡で見えるようなブラックホールなら温度は途方もなく低く、周囲の空虚な宇宙空間よりもはるかに冷たい。そのため実際の Hawking 放射は無視できるほど弱く、直接測定されたことはない。重要なのは概念上の意味だ。Hawking 放射によって、ブラックホール力学と熱力学の類似が本物の熱力学へ変わる。ブラックホールが実際に温度をもつため、これらの法則に現れる「温度」と「エントロピー」は形式的な偶然ではなく、本当の熱力学量になる。（これは今回の論文の結果ではなく背景説明である。）

この対応を支える中心的な結果が、**ブラックホール力学の第一法則**（Bardeen, Carter, Hawking, 1973）だ。言葉でいえば、ブラックホールを一つの定常状態から近接する別の定常状態へ少しだけ動かしたとき、質量変化は温度 × エントロピー変化に、回転の項を加えたものに等しい。ブラックホール版の「入った熱 = 温度 × エントロピー変化」である。

ただし「近接する定常状態」という言葉に落とし穴がある。1973 年の整った法則は、静かに平衡している 2 つのブラックホールを比較し、その差を無限小とする。実際の**過程**——ブラックホールが恒星を飲み込む、2 つのブラックホールが合体する、誕生直後のブラックホールが激しくリングダウンする——を記述したことはない。まさに私たちが最も理解したい場面なのに、「静かに座っている」とは正反対だ。ブラックホールが一番面白い瞬間に、整った法則は黙ってしまう。

素朴な修正がうまくいかない理由

簡単に直せそうに思えるかもしれない。物質が落ち込むにつれて地平線が大きくなるのを見ればよい、と。問題は、どの地平線を見るかだ。

多くの人が思い浮かべる地平線——真の「戻れない境界」である**事象の地平線**——には、微妙で厄介な性質がある。宇宙の未来全体によって定義されるのだ。事象の地平線が今どこにあるか知るには、この先永遠に何がブラックホールへ落ちるのか、すべて知る必要がある。これは細かい技術問題ではない。将来そのブラックホールへ落ち込むことが運命づけられた物質がまだ到着していなくても、完全に空で平坦な空間領域の中で事象の地平線が先に成長し始めることさえある。局所的には何も起きていない場所で面積が増えることがある。

物質が来る前に、どうして地平線が成長できるのか？

この問題の専門的な呼び名は、**事象の地平線のテレオロジカルな性質**、あるいは**大域的定義**である。ここで「テレオロジカル」とは、地平線に目的がある、未来を予知する、影響を過去へ送る、という意味ではない。ある出来事が地平線の内側に属するかどうかを決めるには、時空の未来履歴を完全に知る必要がある、という意味だ。

形式的定義も同じことを短く述べる。**未来光的無限遠**——「I-plus」、 I^+ ——を、光が永遠に逃げ続け、ほかに何もない無限遠の未来へ到達する目的地だと考える。事象の地平線は、外向きの光信号が最終的にそこへ到達できる出来事と、どんな信号も永遠に到達できない出来事の境界である。一般相対論の標準記法では、未来光的無限遠の因果的過去の境界、 $\partial J^-(I^+)$ である。定義そのものに「いつか」が入っているため、今ここだけで行う測定では事象の地平線を厳密には位置決定できない。

球殻が崩壊する例では、この奇妙さが見やすい。殻が到着する前、その内部は空で局所的に平坦でもよい。中心から外向きの光線を、少しずつ遅い時刻に順番に放つ。早い光線は逃げられるが、遅い光線は崩壊する殻と出会い、そこから出られない時空幾何に入る。事象の地平線は、この2つの結果を分ける境界だ。時間を逆にたどると、この境界は中心から始まり、殻が届く前のまだ空で平坦な内部を広がっていく。面積増加はその場所での物質流を報告しているのではなく、完成した時空の中でどの脱出経路が開いているかを記録している。

ここで未来が過去へ作用しているわけではない。もし殻が進路を変えてブラックホールが形成されなければ、完成した時空そのものが別物になり、その以前の領域は事象の地平線の一部ではなかったことになる。教訓は「未来が過去を変える」ではなく、事象の地平線は**大域的な因果境界**であり、近くの観測者が一瞬で検出できる表面ではない、ということだ。ブラックホールの変化を追う必要があるとき、物理学者が準局所的・力学的地平線を使う理由がここにある。

この性質のため、事象の地平線はブラックホールの「状態」を逐次記録するには使いにくい。コンピュータシミュレーションでも、計算が終わるまで正確な位置を決められない。まして温度やエントロピーを一瞬ごとに追う用途には向かない。

解決策：局所的に定義できる地平線

Abhay Ashtekar、Daniel Paraizo、Jonathan Shu による新論文は、別の地平線概念に基づく。無限の未来を参照せず、その近傍の幾何だけで定義される**準局所的な地平線**だ。これらの「力学的地平線区間」は、数値相対論研究者が合体シミュレーションでブラックホールを見つける際にすでに使っている。局所的で正直だからだ。実際にエネルギーが横切る場所だけで面積が増える。

その上で著者らは、さらに難しい問題を解く。通常の熱力学では、平衡から遠い系は扱いにくい。温度や圧力を一つにきれいに割り当てることができず、それらは系が落ち着いて初めて定義できるからだ。ブラックホールにも同じ問題がある。しかし著者らは、一般相対論の特殊な性質を使えば回避できると示す。平衡状態のブラックホール、つまり Kerr ブラックホールは、大きさとスピンという2つの数だけで決まる。そこで著者らは、どれほど激しく進化する非平衡地平線でも、各瞬間に「一時的に似ている」平衡ブラックホールの2つの数を読み出す写像を構成する。その写像を通して、激変中のブラックホールにも**時間依存の温度とスピン**を割り当てられる。

局所的に定義された地平線を横切るエネルギーと、瞬間的な示強量という要素を揃え、著者らは第一法則を任意に平衡から遠いブラックホールまで拡張した。重要なのは、新しい法則が、凍結した2状態間の無限小差ではなく、**実在の物理過程**（物質や重力波が地平線を横切ること）によって起こる**有限変化**を記述することだ。対応する第二法則も定量化され、地平線面積の増加量が流入したエネルギーと直接結びつく。第一・第二法則を合わせると、明快な結論へ向かう。考える最も激しい出来事の最中でも、ブラックホールのエントロピーを測る正しい量は、依然として地平線面積である。

この研究からは言えないこと

- **量子重力を解決していない**。これは古典的一般相対論の結果で、地平線面積をエントロピーと同一視する標準的な考えを使う。そのエントロピーをより根本的なものから導出してはいない。
- **ミクロ状態を数えていないし、ブラックホールのエントロピーが何からできているかを説明していない**。ブラックホール熱力学の帳簿付けを拡張したのであって、箱を開けて微視的自由度を見せたわけではない。
- **ブラックホール情報パラドックスを解決していない**。その問題は量子論に属し、この論文は扱わない。
- **観測や測定ではない**。望遠鏡もデータも重力波信号も関与しない——これは数学である。ここで「合体中ブラックホールの温度」と呼ぶものは方程式内で精密に定義された量であり、温度計で読めるものではない。
- **Bekenstein と Hawking を覆すものではない**。元の平衡限定の法則が何も言えなかった力学的領域へ、その描像を拡張している。

証拠をどう評価するか

この種の研究としては強い。分野の第一人者を含むグループによる、慎重で内部整合的な数理物理の仕事で、Physical Review Letters の *Editors' Suggestion* として発表された（長い導出は伴論文で扱う）。

正直な但し書きは、質ではなく種類に関するものだ。

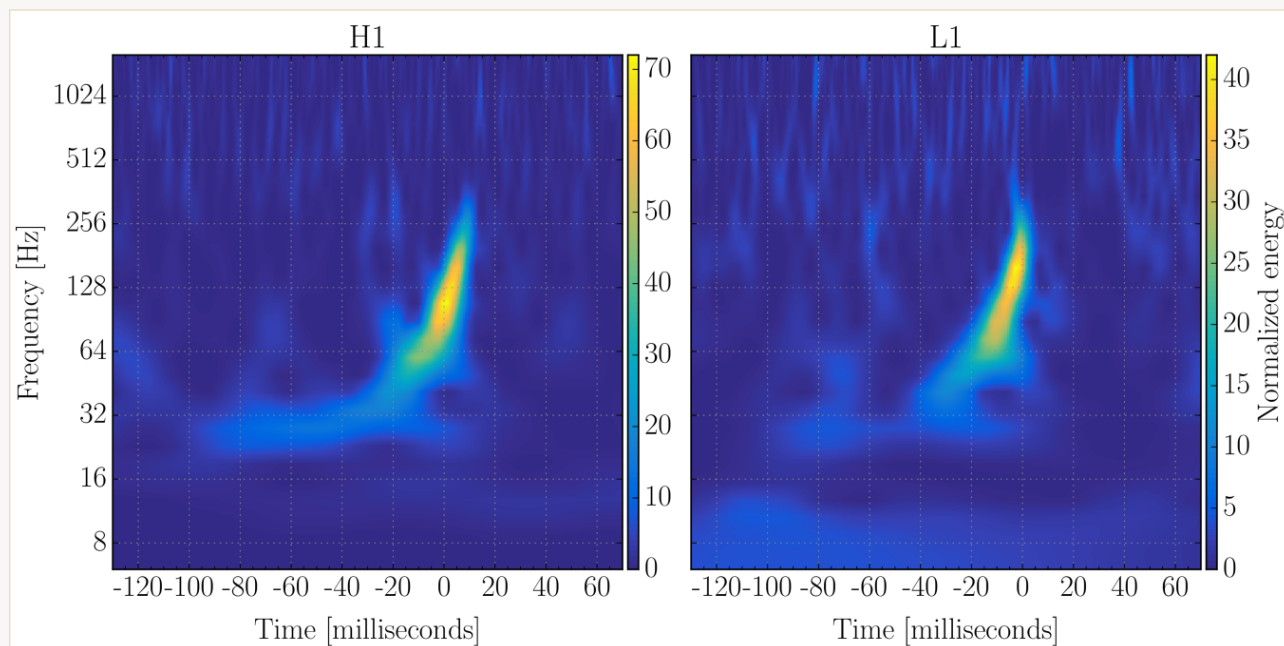
- 地平線面積がエントロピーであるという慣例的仮定（面積を Newton 定数と Planck 定数を含む 4 倍量で割る）に立っている。完全な量子重力理論が将来この同一視を修正すれば、解釈もそれに従って動く。
- 見出しになる計算は最も一般的なケース（空間的な力学的地平線、軸対称）で詳細に行われている。著者らは制限は本質的ではないと論じるが、完全一般な主張の一部は別の結果にも依存する。
- 「非平衡でもエントロピー＝地平線面積」は、新しい第一・第二法則によって非常に自然になる同一視であり、微視的統計から証明した定理ではない。

つまり、50 年の枠組みを厳密に拡張した研究であり、実験的発見でも、これから検証される新しい自然法則でもない。

なぜ重要なのか

理由は 2 つ、実用的なものと概念的なものがある。

実用面では、私たちが今実際に研究しているブラックホール——LIGOやVirgoが合体音を聞くブラックホール——は、最も重要な瞬間を平衡から遠い状態で過ごす。この論文の量は、シミュレーションがすでに追跡している局所定義の地平線から作られる。したがって、合体や崩壊の最中のブラックホールについて、前後だけでなくエントロピーや温度を原理に沿って語れる方法になる。



最初に直接検出された重力波信号 GW150914 は、2つのブラックホール合体から来た。この時間-周波数図は LIGO Hanford（左）と LIGO Livingston（右）の信号を示し、どちらも合体へ近づくにつれ明るい軌跡が高周波へ掃き上がる。これは非平衡ブラックホール系の実例であり、新しい熱力学枠組みの背景説明であって、その枠組みを観測で検証した証拠ではない。

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

概念面では、ブラックホールの熱力学的振る舞いは、量子重力について私たちが持つ数少ない具体的手掛かりの一つだ。重力、量子論、熱力学が目に見えて出会う場所である。激しく変化するブラックホールについて「エントロピー」「温度」が何を意味するかを精密化することは、将来の量子理論が当てなければならない標的を絞る。ブラックホールのエントロピーが本当は何なのかという深い問いには答えない。その問いをより正確に定式化する——この物理学の一角では、それが仕事の大半を占める。

要点

ブラックホールは熱力学と対応する法則に従うが、整った 1973 年の「第一法則」は平衡して静止するブラックホール同士を比較するだけで、実際の過程を記述できなかった。Ashtekar、Paraizo、Shu は、局所的に定義される「力学的地平線」と、変化中のブラックホールへ瞬間的な温度・スピンを割り当てる写像を用い、第一・第二法則を合体、降着、リングダウンなど任意に平衡から遠いブラックホールへ拡張した。結論として、激しい出来事の中中でも地平線面積がエントロピーの適切な尺度であり続ける。これは古典的一般相対論の厳密な結果であり、量子重力でも観測でも、ミクロ状態の計数でも、情報パラドックスの解決でもない。

冷静に見ると

論文が示していること：準局所的な力学的地平線に基づき、完全に力学的で平衡から遠いブラックホールへ、ブラックホール力学の第一・第二法則を数学的に整合する形で拡張した。有限で過程に基づく第一法則と定量的第二法則を定義し、力学的ブラックホールのエントロピーを地平線面積と同一視することを自然にする。

実質的だが解釈を含むこと：非平衡での「エントロピー＝地平線面積」という同一視。新しい法則で強く動機付けられるが、標準的な古典的面積-エントロピー仮定を受け継ぐのであって、そこから導出したものではない。

示していないこと：量子重力理論。ブラックホールエントロピーの微視的起源や「数え上げ」。情報パラドックスの解決。観測・実験結果。物理的に温度計で測れる温度。

主な限界：全体を通して古典的一般相対論。中心結果は一般的な空間的・軸対称ケースで証明され、より一般の場合は伴う研究に基づいて議論される。面積-エントロピー同一視は仮定であり、統計力学から証明していない。

一般の読者はどの程度信頼すべきか？ブラックホール熱力学を本当に力学的領域へ拡張する、堅固で評価の高い理論的前進だという点には高い信頼を置いてよい。同じくらい高い確信をもって、これは新観測の主張でも、量子重力でも、有名な情報問題の解決でもないと言える。正しい受け止め方は、望遠鏡ではなく黒板で踏み出した、本物の理解の一步だ。

出典

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

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