



The CLEAN PAPER

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

Buracos negros obedecem a ‘leis’ termodinâmicas — um novo resultado as estende a buracos negros violentamente fora do equilíbrio

Desde a década de 1970, sabe-se que buracos negros obedecem a leis que espelham a termodinâmica, mas a versão mais limpa só se aplicava a buracos negros quietos em equilíbrio. Um novo artigo da Physical Review Letters estende a primeira e a segunda leis a buracos negros que mudam rapidamente — engolindo matéria, fundindo-se ou irradiando — por meio de ‘horizontes dinâmicos’ definidos localmente. Isso permite atribuir temperatura e entropia até mesmo a um buraco negro em evolução violenta. É um resultado matemático da relatividade geral clássica, não nova gravidade quântica, não uma observação e não uma solução para o quebra-cabeça da informação em buracos negros.

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

Buracos negros têm «leis» parecidas com as da termodinâmica. A versão elegante só funcionava quando nada acontecia

Um dos factos mais estranhos da física é que buracos negros se comportam como objetos quentes. No início da década de 1970, Bekenstein e Hawking perceberam que as equações que governam buracos negros correspondem, termo por termo, às leis da termodinâmica: um buraco negro tem entropia proporcional à área do seu horizonte e temperatura proporcional à sua gravidade superficial. Hawking mostrou depois que a temperatura é real no sentido mais profundo: um buraco negro realmente brilha, embora de forma extremamente fraca, por meio de radiação térmica.

O que é a radiação Hawking?

Classicamente, nada escapa de um buraco negro, portanto ele deveria ser perfeitamente negro e não ter temperatura alguma. Em 1974, Stephen Hawking mostrou que isso muda quando a teoria quântica é considerada perto do horizonte: um buraco negro emite um brilho térmico ténue e, assim, perde massa lentamente, ou «evapora». O espectro é térmico na temperatura Hawking, embora a propagação pelo espaço-tempo curvo modifique a radiação que chega ao infinito. numa imagem heurística comum — que não é a derivação real de Hawking —, flutuações quânticas logo fora do horizonte criam pares nos quais uma partícula escapa como radiação e a outra cai para dentro.

A característica central é que essa temperatura é *inversamente* proporcional à massa do buraco negro: quanto menor ele é, mais quente fica. Para qualquer buraco negro que um telescópio pudesse observar, a temperatura é extraordinariamente baixa — muito abaixo da temperatura do espaço vazio ao redor —, portanto o brilho é, na prática, completamente desprezível e nunca foi medido diretamente. A sua importância é conceitual: a radiação Hawking transforma a *analogia* entre a mecânica dos buracos negros e a termodinâmica em algo real. Como o buraco negro de facto tem temperatura, a «temperatura» e a «entropia» dessas leis são grandezas termodinâmicas reais, não uma coincidência formal. (Isso é contexto para o artigo atual, não um dos seus resultados.)

Essa correspondência é ancorada por um resultado chamado **primeira lei da mecânica dos buracos negros** — Bardeen, Carter e Hawking, 1973. Em palavras, ela diz: se um buraco negro for deslocado ligeiramente de um estado estacionário para outro estado estacionário próximo, a mudança na sua massa será igual à temperatura multiplicada pela mudança de entropia, mais um termo associado à rotação. É a versão para buracos negros de «o calor fornecido é igual à temperatura vezes a mudança de entropia».

Há uma dificuldade escondida na expressão *estado estacionário próximo*. A elegante lei de 1973 compara dois buracos negros que permanecem tranquilamente em equilíbrio e diferem apenas infinitesimalmente. Ela nunca descreve de facto um **processo**: um buraco negro a engolir uma estrela, dois buracos negros a fundirem-se ou um recém-nascido a oscilar depois de uma origem violenta. Essas são justamente as situações que mais queremos compreender, e são o oposto de «ficar parado». A lei

elegante fica muda exatamente quando o buraco negro se torna interessante.

Porque é que a solução óbvia não funciona

Pode parecer que a solução é simples: basta observar como o horizonte cresce enquanto a matéria cai. O problema é *qual* horizonte.

O horizonte que a maioria imagina — o **horizonte de eventos**, o verdadeiro ponto sem retorno — tem uma propriedade sutil e incómoda: ele é definido usando todo o futuro do universo. Para saber onde está o horizonte de eventos *agora*, seria preciso conhecer tudo o que cairá no buraco negro para sempre. Isso não é uma technicalidade. Um horizonte de eventos pode começar a crescer numa região do espaço completamente vazia e plana *antes* de chegar a matéria que o alimentará, simplesmente porque essa matéria está destinada a chegar depois. A sua área pode aumentar onde, localmente, não acontece absolutamente nada.

Como um horizonte pode crescer antes de a matéria chegar?

O nome científico desse quebra-cabeça é **natureza teleológica do horizonte de eventos**, também chamada da sua **definição global**. Aqui, «teleológico» não significa que o horizonte tenha um propósito, preveja o futuro ou envie influência para trás no tempo. Significa que só é possível decidir se um evento está dentro do horizonte conhecendo toda a história futura do espaço-tempo.

A definição formal diz a mesma coisa de modo mais compacto. Imagine o **infinito nulo futuro** — chamado «I mais» e escrito $\mathcal{I}^+$ — como o destino alcançado pela luz que escapa para sempre em direção a um futuro de resto vazio e infinitamente distante. O horizonte de eventos é a fronteira entre eventos dos quais um sinal de luz dirigido para fora pode, por fim, chegar a esse destino e eventos dos quais nenhum sinal jamais conseguirá. Na notação padrão da relatividade geral, é a fronteira do passado causal do infinito nulo futuro: $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$. Como a palavra *jamais* está embutida na definição, nenhuma medição feita apenas aqui e agora consegue localizar exatamente o horizonte de eventos.

Uma casca esférica em colapso torna a estranheza visível. Antes de a casca chegar, a região no seu interior pode estar vazia e ser localmente plana. Envie raios de luz para fora a partir do centro em instantes cada vez posteriores: os primeiros escapam, enquanto os posteriores encontram a casca em colapso dentro de uma geometria da qual já não conseguem sair. O horizonte de eventos é a fronteira que separa esses dois resultados. Se essa fronteira for seguida para trás, ela começa no centro e se expande pelo interior ainda vazio e plano antes de a casca chegar. O crescimento da sua área não regista um fluxo local de matéria; regista quais rotas de escape continuam abertas no espaço-tempo completo.

Nada nessa imagem age para trás no tempo. Se a casca mudasse de trajetória e nenhum buraco negro se formasse, o espaço-tempo completo seria diferente e aquela região anterior não teria feito parte de um horizonte de eventos. A lição não é que o futuro muda o passado, mas que o horizonte de eventos é uma **fronteira causal global**, não uma superfície que um observador próximo possa detetar num instante. É justamente por isso que físicos usam horizontes quase

locais ou dinâmicos quando precisam acompanhar um buraco negro enquanto ele muda.

Isso torna o horizonte de eventos inútil como registo contínuo do «estado» de um buraco negro. Ele nem sequer pode ser localizado numa simulação computacional antes que ela termine, muito menos usado para acompanhar temperatura ou entropia instante a instante.

A mudança: um horizonte que pode ser definido localmente

O novo artigo, de Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo e Jonathan Shu, constrói seu resultado sobre uma noção diferente de horizonte: uma noção **quase local**, definida apenas pela geometria da sua vizinhança imediata, sem referência ao futuro infinito. Esses «segmentos de horizonte dinâmico» são as superfícies que relativistas numéricos já usam para localizar buracos negros em simulações de fusões, justamente porque são locais e honestas: sua área só cresce onde energia de facto atravessa.

Os autores também resolvem a metade mais difícil do problema. Na termodinâmica comum, um sistema longe do equilíbrio é notoriamente escorregadio: não se pode atribuir a ele, de forma limpa, uma única temperatura ou pressão, porque essas grandezas só ficam bem definidas quando as coisas se estabilizam. Buracos negros apresentam o mesmo problema, até que — mostram os autores — seja usada uma característica especial da relatividade geral. Um buraco negro *em* equilíbrio — um buraco negro de Kerr — é determinado por apenas dois números: seu tamanho e sua rotação. Assim, os autores constroem um mapa que toma qualquer horizonte em evolução violenta e fora do equilíbrio e extrai, em cada instante, os dois números do buraco negro de equilíbrio com o qual ele se parece momentaneamente. Por meio desse mapa, até mesmo um buraco negro a mudar violentamente pode receber uma **temperatura e uma rotação dependentes do tempo**.

Com essas peças — uma energia definida localmente fluindo através do horizonte e grandezas intensivas instantâneas —, eles estendem a primeira lei a buracos negros arbitrariamente distantes do equilíbrio. De forma crucial, a nova lei descreve **mudanças finitas causadas por processos físicos reais** — matéria e ondas gravitacionais atravessando o horizonte —, não passos infinitesimais entre dois estados congelados. Ela vem acompanhada de uma segunda lei correspondente cujo enunciado se torna *quantitativo*: a área do horizonte aumenta numa quantidade diretamente ligada à energia que entrou. Juntas, a primeira e a segunda leis apontam para uma conclusão limpa: mesmo para um buraco negro no meio do evento mais violento imaginável, a medida adequada de entropia continua a ser a área do seu horizonte.

O que isto *não* demonstra

- **Não** resolve a gravidade quântica. É um resultado da relatividade geral *clássica* que usa a identificação padrão da área do horizonte com entropia. Não deriva essa entropia de algo mais fundamental.

- **Não** conta microestados nem explica *do que* é feita a entropia de um buraco negro. Estende a contabilidade da termodinâmica de buracos negros; não abre a caixa para revelar os graus de liberdade microscópicos.
- **Não** resolve o paradoxo da informação dos buracos negros. Esse problema pertence à teoria quântica; este artigo não o aborda.
- **Não** é uma observação nem uma medição. Não há telescópio, dados ou sinal de ondas gravitacionais: são matemáticas. A «temperatura» de um buraco negro em fusão é aqui uma grandeza definida com precisão nas equações, não algo que possa ser lido com um termómetro.
- **Não** contradiz Bekenstein e Hawking. *Estende* sua imagem ao regime dinâmico no qual a lei original, restrita ao equilíbrio, não tinha nada a dizer.

Até que ponto são sólidas as evidências?

Sólidas para o que são: um trabalho de física matemática cuidadoso e internamente coerente, vindo de um grupo de destaque na área e publicado como *Editors' Suggestion* na *Physical Review Letters* — um artigo complementar desenvolve as derivações mais longas.

As cautelas honestas dizem respeito ao *tipo* de resultado, não à sua qualidade:

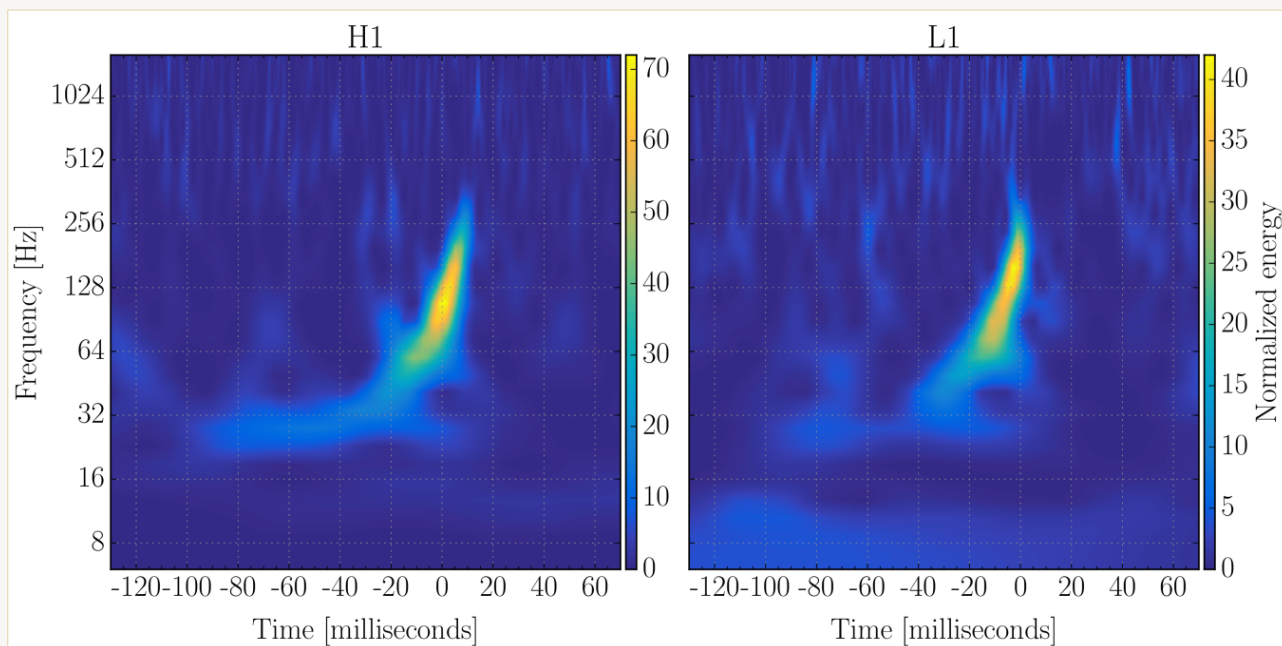
- Ele se apoia na premissa convencional de que a área do horizonte *é* entropia — a área dividida por quatro vezes a constante de Newton e a constante de Planck. Se uma teoria completa de gravidade quântica algum dia revisar essa identificação, a interpretação mudará junto.
- Os cálculos principais são desenvolvidos para o caso mais comum — horizontes dinâmicos espaciais e axialmente simétricos —; os autores argumentam que as restrições não são essenciais, mas a afirmação plenamente geral depende de resultados apresentados em outros trabalhos.
- «Entropia é igual à área do horizonte mesmo fora do equilíbrio» é uma *identificação* convincente que as novas primeira e segunda leis tornam natural, não um teorema derivado da estatística microscópica.

Em resumo: uma extensão rigorosa de uma estrutura com cinquenta anos, não uma descoberta experimental nem uma nova lei física à espera de teste.

Porque é que isso importa

Por dois motivos, um prático e outro conceitual.

Na prática, os buracos negros que agora estudamos de verdade — aqueles que LIGO e Virgo ouvem se fundir — passam seus momentos mais importantes longe do equilíbrio. As grandezas deste artigo são construídas a partir dos mesmos horizontes definidos localmente que as simulações já acompanham, portanto oferecem uma forma fundamentada de falar sobre entropia e temperatura de um buraco negro *durante* uma fusão ou um colapso, não apenas antes e depois.



GW150914, o primeiro sinal de ondas gravitacionais detetado diretamente, veio da fusão de dois buracos negros. Estes mapas de tempo e frequência mostram o sinal no LIGO Hanford — à esquerda — e no LIGO Livingston — à direita: nos dois detetores, o traço brilhante sobe à medida que a frequência do sinal aumenta em direção à fusão. É um exemplo real de um sistema de buracos negros longe do equilíbrio; fornece contexto para a nova estrutura termodinâmica, não evidência observacional a seu favor.

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

Conceitualmente, o comportamento termodinâmico dos buracos negros é uma das poucas pistas concretas que temos sobre a gravidade quântica: é o lugar onde gravidade, teoria quântica e termodinâmica se encontram de forma visível. Tornar mais preciso o significado de «entropia» e «temperatura» para um buraco negro que muda violentamente deixa mais definido o alvo que qualquer futura teoria quântica terá de atingir. Isso não responde à pergunta profunda sobre o que a entropia de um buraco negro realmente é. Formula a pergunta com mais precisão — o que, nesse canto da física, é uma grande parte do trabalho.

Resumo claro

Buracos negros obedecem a leis que espelham a termodinâmica, mas a elegante «primeira lei» de 1973 apenas comparava buracos negros quietos e em equilíbrio e não conseguia descrever um processo real. Ashtekar, Paraizo e Shu estendem tanto a primeira quanto a segunda leis a buracos negros arbitrariamente longe do equilíbrio — fundindo-se, alimentando-se ou amortecendo suas oscilações — usando «horizontes dinâmicos» definidos localmente e um mapa que atribui a um buraco negro em mudança uma temperatura e uma rotação instantâneas. A conclusão é que a área do horizonte continua a ser a medida correta de entropia mesmo durante eventos violentos. É um resultado rigoroso da relatividade geral clássica, não gravidade quântica, não uma observação, não uma contagem de microestados e não uma solução para o paradoxo da informação.

Verificação sem rodeios

O que o artigo mostra: uma extensão matematicamente coerente da primeira e da segunda leis da mecânica dos buracos negros para buracos negros plenamente dinâmicos e longe do equilíbrio, construída sobre horizontes dinâmicos quase locais. Ela define uma primeira lei finita baseada em processos e uma segunda lei quantitativa, e torna natural identificar a entropia de um buraco negro dinâmico com a área do seu horizonte.

O que é genuíno, mas interpretativo: a identificação «entropia = área do horizonte» fora do equilíbrio. As novas leis a tornam convincente, mas ela herda a premissa clássica padrão de área-entropia em vez de derivá-la.

O que ele não mostra: uma teoria quântica da gravidade; uma origem microscópica ou «contagem» da entropia de buracos negros; uma solução para o paradoxo da informação; qualquer resultado observacional ou experimental; ou uma temperatura que pudesse ser medida fisicamente.

Principais limitações: relatividade geral clássica em todo o trabalho; resultados principais demonstrados para o caso comum espacial e axialmente simétrico, com a generalidade defendida por trabalhos complementares; e identificação área-entropia assumida, não demonstrada a partir da mecânica estatística.

Quanta confiança um leitor geral deve ter? Alta confiança de que este é um avanço teórico sólido e bem avaliado que realmente estende a termodinâmica dos buracos negros ao regime dinâmico. Confiança igualmente alta de que *não* é uma afirmação sobre novas observações, nem gravidade quântica, nem uma solução para o famoso problema da informação. A postura correta: um passo real de compreensão, dado com giz, não com telescópio.

Fontes

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

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