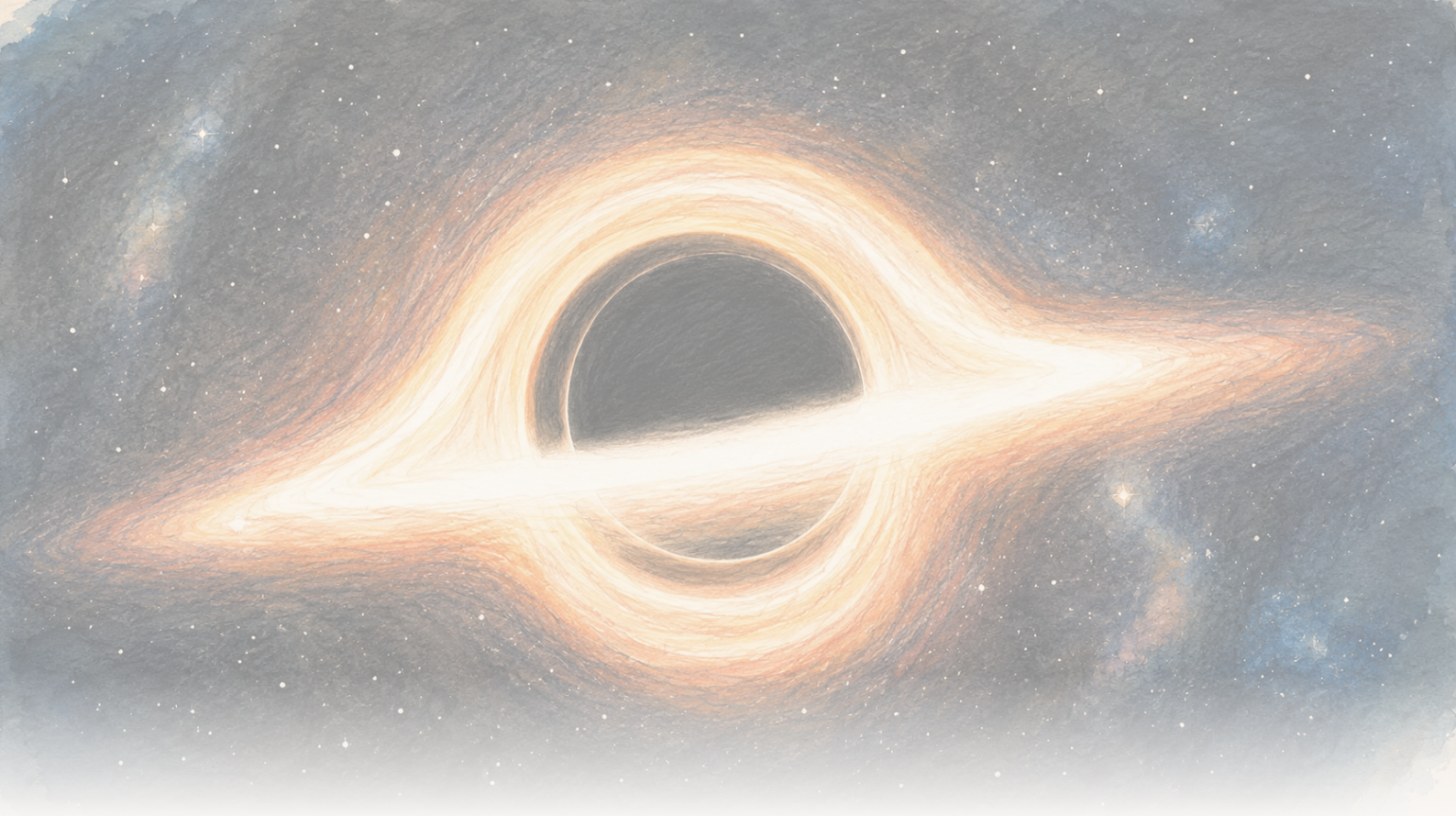




The CLEAN PAPER

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

黑洞遵守类似热力学的“定律”——新结果把它们推广到剧烈远离平衡的黑洞

自 20 世纪 70 年代以来，人们已经知道黑洞遵守一组与热力学相呼应的定律，但最整洁的版本只适用于安静处在平衡态的黑洞。一篇新的 *Physical Review Letters* 论文借助局域定义的“动力学视界”，把第一和第二定律推广到快速变化的黑洞——吞噬物质、并合、辐射或振铃衰减中的黑洞。这样，即便黑洞正在剧烈演化，也可以给它定义温度和熵。这是经典广义相对论中的数学结果，不是新的量子引力，不是观测，也没有解决黑洞信息难题。

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

黑洞有一套看起来像热力学的“定律”。但最整洁的版本，只在什么都没发生时才好用

物理学中最奇怪的事实之一，是黑洞竟然像有温度的物体。20 世纪 70 年代初，贝肯斯坦和霍金发现，支配黑洞的方程与热力学定律几乎可以逐项对应：黑洞的熵与视界面积成正比，温度与表面引力成正比。随后霍金进一步证明，这个温度并不只是形式上的类比——从最深层意义上说，黑洞确实会发出极其微弱的热辐射。

什么是霍金辐射？

在经典理论里，没有任何东西能从黑洞逃出去，因此黑洞理应完全“黑”，也谈不上有什么温度。但斯蒂芬·霍金在 1974 年证明，一旦在视界附近纳入量子理论，情况就会改变：黑洞会发出微弱的热辐射，因此慢慢失去质量，也就是“蒸发”。其源头谱在霍金温度下是热谱，而辐射穿过弯曲时空传播时，又会进一步改变最终到达无穷远处的谱形。一个常见的启发式图像——并不是霍金真正的推导——是视界外的量子涨落产生粒子对，其中一个伙伴逃出去成为辐射，另一个落入黑洞。

关键特征是，这个温度与黑洞质量成反比：黑洞越小，温度越高。对任何望远镜有可能看见的天体黑洞而言，这个温度都低得惊人——远低于周围空旷宇宙的温度——所以实际辐射完全可以忽略，也从未被直接测到。它的重要性在概念上：霍金辐射把“黑洞力学与热力学之间的类比”变成了真正的热力学对应。既然黑洞确实有温度，那么这些定律中的“温度”和“熵”就是实际的热力学量，而不只是形式上的巧合。（这只是本文论文的背景，不是它的新结果。）

这种对应关系的核心，是所谓的**黑洞力学第一定律**，由 Bardeen、Carter 和霍金在 1973 年提出。用语言描述就是：如果把一个黑洞从某个稳定状态轻轻扰动到附近另一个稳定状态，它的质量变化等于温度乘以熵的变化，再加上一个与自旋有关的项。它相当于黑洞版的“热量变化等于温度乘以熵变”。

问题藏在“附近的稳定状态”这几个字里。1973 年那条干净的定律比较的是两个静静待在平衡态的黑洞，而且两者之间只差一个无穷小变化。它其实从来没有描述一个真正的**过程**——例如黑洞吞下一颗恒星、两个黑洞并合，或一个刚诞生的黑洞在剧烈扰动后振铃衰减。而这些恰恰是我们最想理解的情形，也恰恰与“安静地待着”相反。黑洞最有趣时，那条整洁定律反而说不出话。

为什么最直观的修补办法行不通

你可能会觉得修补很简单：物质掉进去时，直接看视界怎样变大不就行了？问题在于——看哪一种视界？

大多数人脑中想象的，是**事件视界**，也就是那条真正的“有去无回”边界。但事件视界有一个微妙又麻烦的性质：它的定义依赖整个宇宙的未来。要知道事件视界此刻在哪里，你原则上必须知道从现在开始直到永远，究竟还有什么东西会落进去。这并不是一个可以忽略的技术细节。即使某个区域现在完全空无一物、局部还是平直时空，只要未来注定有物质在那里形成黑洞，事件视界就可能在那批物质真正到来之前已经开始增长。于是，局部什么都没发生，视界面积却能变大。

为什么物质还没到，视界就能先长起来？

这个问题的科学名称是事件视界的目的论性质（**teleological nature**），也常说它具有**全局定义**。这里“目的论”不是说视界有某种目的、能预测未来，或会把影响从未来倒着传回过去。它的意思是：某个事件究竟是否落在视界以内，只有知道完整的未来时空历史后才能判断。

形式定义只是把同一件事说得更紧凑。想象**未来类光无穷远**——通常读作“**I-plus**”，写作 $\mathcal{I}^+$ ——它代表那些永远逃离、最终抵达无限遥远未来的光所到达的终点。事件视界就是这样一条边界：边界外的事件可以发出向外的光，最终到达 $\mathcal{I}^+$ ；边界内的事件则永远做不到。在广义相对论的标准记号中，它是未来类光无穷远的因果过去的边界： $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$ 。因为“永远能不能到达”这层意思已经写进定义，仅凭此时此地的测量就不可能精确定位事件视界。

一个坍缩的球壳能把这种怪异直观地显示出来。在球壳到来之前，它内部可以是空的，而且局部完全平直。假设从中心在越来越晚的时刻不断向外发射光线：较早发出的光能逃出去；较晚发出的光则会遇到正在坍缩的球壳，进入一种再也逃不出的几何。事件视界就是把这两种结局分开的边界。把这条边界沿时间向后追踪，它会从中心开始，在球壳还没有抵达时，就已经穿过仍然空旷、平直的内部区域向外扩展。这个面积增长并不是在那里记录了任何局部物质流，而是在完整时空中记录“哪些逃逸路径最终还保持开放”。

整个图景里没有任何东西倒着作用于时间。如果球壳后来被偏转，黑洞根本没有形成，那么完整时空就会不同，先前那块区域也不会属于某个事件视界。这里的教训不是“未来改变过去”，而是事件视界是一条**全局因果边界**，而不是附近观察者能在某一个瞬间直接探测到的表面。也正因如此，当物理学家需要跟踪一个正在变化的黑洞时，会使用准局域视界或动力学视界。

这使事件视界很难用来实时记录黑洞的“状态”。在计算机模拟中，你甚至往往要等整个模拟结束后才能确定事件视界在哪里，更不用说用它逐时刻追踪温度或熵了。

关键一步：使用一种可以局域定义的视界

Abhay Ashtekar、Daniel Paraizo 和 Jonathan Shu 的新论文采用另一种视界概念——一种**准局域视界**。它只由自身邻域中的几何定义，不需要知道无限遥远的未来。这些“动力学视界片段”正是数值相对论研究者在黑洞并合模拟中已经使用的表面，因为它们既局域又“诚实”：只有当能量真的穿过这些表面时，它们的面积才会增长。

接下来，作者解决了问题更难的一半。在普通热力学中，远离平衡的系统很难处理：温度、压强这类量通常只有在系统足够接近平衡时才能明确地定义为一个单一数值。黑洞也有同样麻烦——除非像作者这样利用广义相对论的一个特殊性质。处于平衡态的黑洞，也就是克尔黑洞，只需要两个数就能完全确定：它的大小和自旋。因此，作者构造了一个映射：无论一个视界正在多么剧烈地演化、远离平衡，在每一个瞬间，都给它找出“此刻最像的平衡黑洞”的那两个参数。借助这张映射，即便黑洞正在猛烈变化，也可以给它指定一个**随时间变化的温度和自旋**。

有了这两部分——局域定义的能量穿过视界，以及瞬时热力学量——作者把第一定律推广到了任意远离平衡的黑洞。最关键的是，新定律描述的是由真实物理过程造成的**有限变化**（物质和引力波穿越视界），而不是两个冻结状态之间的无穷小差异。他们还给出与之配套的第二定律，而且现在它是定量的：视界面积增加多少，直接与流入的能量联系起来。把第一、第二定律放在一起，得到一个简洁结论——即便黑洞正处于能想象到的最剧烈事件中，衡量其熵的正确量仍然是视界面积。

这项研究不能证明什么

- 它**没有**解决量子引力。这是经典广义相对论中的结果，并采用了“视界面积对应熵”的标准识别。它并没有从更基本的理论推导出这种熵。
- 它**没有**计算微观态，也没有解释黑洞熵究竟“由什么组成”。它扩展的是黑洞热力学中宏观量之间的关系，并没有进一步给出微观自由度的构成。
- 它**没有**解决黑洞信息悖论。那个难题属于量子理论；这篇论文没有触及它。
- 它**不**是一次观测或测量。没有望远镜、没有数据，也没有引力波信号参与证明——这是数学。这里说“正在并合黑洞的温度”，指的是方程中精确定义的量，不是拿温度计能读出来的东西。
- 它**没有**推翻贝肯斯坦和霍金。它是在原来只适用于平衡态的框架无话可说之处，把他们的图景推广到动力学区域。

证据有多强？

就它本身的性质而言，很强：这是一个领域顶尖团队完成的、严谨且内部一致的数学物理结果，并作为 *Editors' Suggestion* 发表在 *Physical Review Letters*；另有一篇配套论文给出更长的推导。

真正需要诚实说明的限制，主要是结果属于什么类型，而不是研究质量问题：

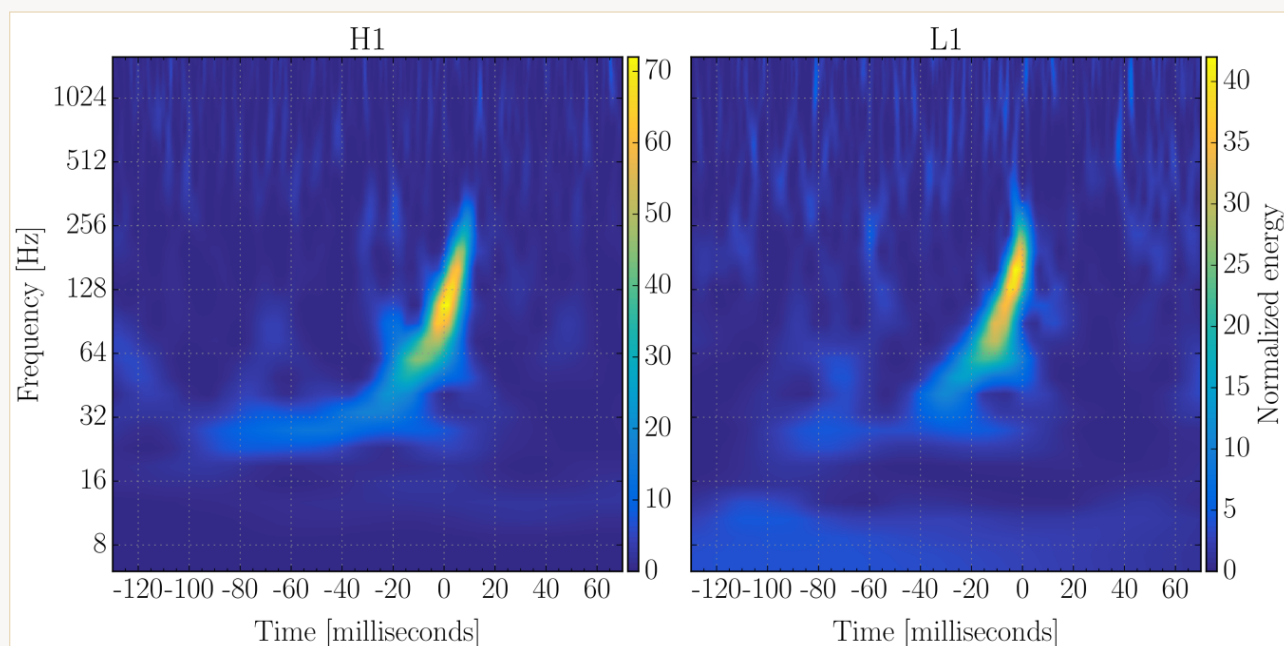
- 它建立在传统假设上：视界面积就是熵（面积除以包含牛顿常数和普朗克常数的标准因子）。如果未来完整的量子引力理论修改了这种对应关系，那么这里的热力学解释也会随之调整。
- 论文的主计算针对最常见的情形展开（类空动力学视界、轴对称）；作者认为这些限制并非本质，但完全一般的表述还依赖其他工作的结果。
- “即使远离平衡，熵也等于视界面积”是一个被新第一、第二定律强烈支持、因而显得很自然的识别；它不是从微观统计直接推出来的定理。

所以，这是一套五十年框架的严格推广，不是实验发现，也不是一条新自然定律等着实验验证。

为什么重要

有两个理由，一个实用，一个概念性。

实用上，我们现在真正研究的黑洞——例如 LIGO 和 Virgo 听到的并合黑洞——在最关键的时刻都远离平衡。这篇论文中的物理量正是从数值模拟已经在追踪的局域视界构造出来，因此现在有了一种有原则的方法，可以讨论黑洞在并合或坍缩过程中的熵和温度，而不只是过程之前和之后。



GW150914 是人类首次直接探测到的引力波信号，来自两个黑洞并合。这两幅时频图分别显示 LIGO Hanford（左）和 LIGO Livingston（右）的信号：在两个探测器中，明亮轨迹都随着信号频率在接近并合时快速升高。这是真实的远离平衡黑洞系统示例，用来提供新热力学框架的背景；它并不是该框架的观测证据。

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

概念上，黑洞的热力学行为是我们少数几个关于量子引力的具体线索之一——在那里，引力、量子理论和热力学明显碰到了一起。把一个剧烈变化黑洞的“熵”和“温度”究竟是什么意思说得更精确，就等于把未来任何量子引力理论必须命中的靶心画得更清楚。它没有回答黑洞熵到底是什么这个深层问题，却把问题本身写得更精确——在这个物理学角落里，这往往已经是大半工作。

简明总结

黑洞遵守一套与热力学相呼应的定律，但 1973 年那个最整洁的“第一定律”只比较静止在平衡态的黑洞，无法描述真实过程。Ashtekar、Paraizo 和 Shu 使用局域定义的“动力学视界”，再通过一个映射给变化中的黑洞指定瞬时温度和自旋，把第一、第二定律都推广到任意远离平衡的黑洞——包括并合、吸积和振铃衰减中的黑洞。结果是，即便发生剧烈事件，视界面积仍然是衡量黑洞熵的合适量。这是经典广义相对论中的严格结果，不是量子引力，不是观测，不是微观态计数，也没有解决信息悖论。

不绕弯检查

论文真正显示了什么：一套数学上自洽的推广，把黑洞力学第一、第二定律扩展到完全动力学、远离平衡的黑洞，并以准局域动力学视界为基础。它定义了一个针对有限真实过程的第一定律和一个定量第二定律，使“动力学黑洞的熵由视界面积衡量”成为很自然的识别。

真实但属于解释的部分：在远离平衡时仍把“熵 = 视界面积”。新定律让这种识别很有说服力，但它继

承了经典框架中标准的面积—熵假设，而不是从更基础理论推导出来。

论文没有显示什么：一套量子引力理论；黑洞熵的微观起源或“计数”；信息悖论的解决；任何观测或实验结果；或一个能实际测量的黑洞温度。

主要局限：全程使用经典广义相对论；主结果严格推导于常见的类空、轴对称情形，更一般性依赖配套工作论证；面积—熵识别是采用的前提，并非从统计力学中证明。

普通读者应该有多大信心？可以高度相信这是一项扎实、受到重视的理论进展，确实把黑洞热力学推广到了动力学区域。同样也可以高度确信：它不是新观测，不是量子引力，更不是著名信息难题的解决方案。最合适的理解是：这是用粉笔而不是望远镜迈出的一步真实进展。

来源

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

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