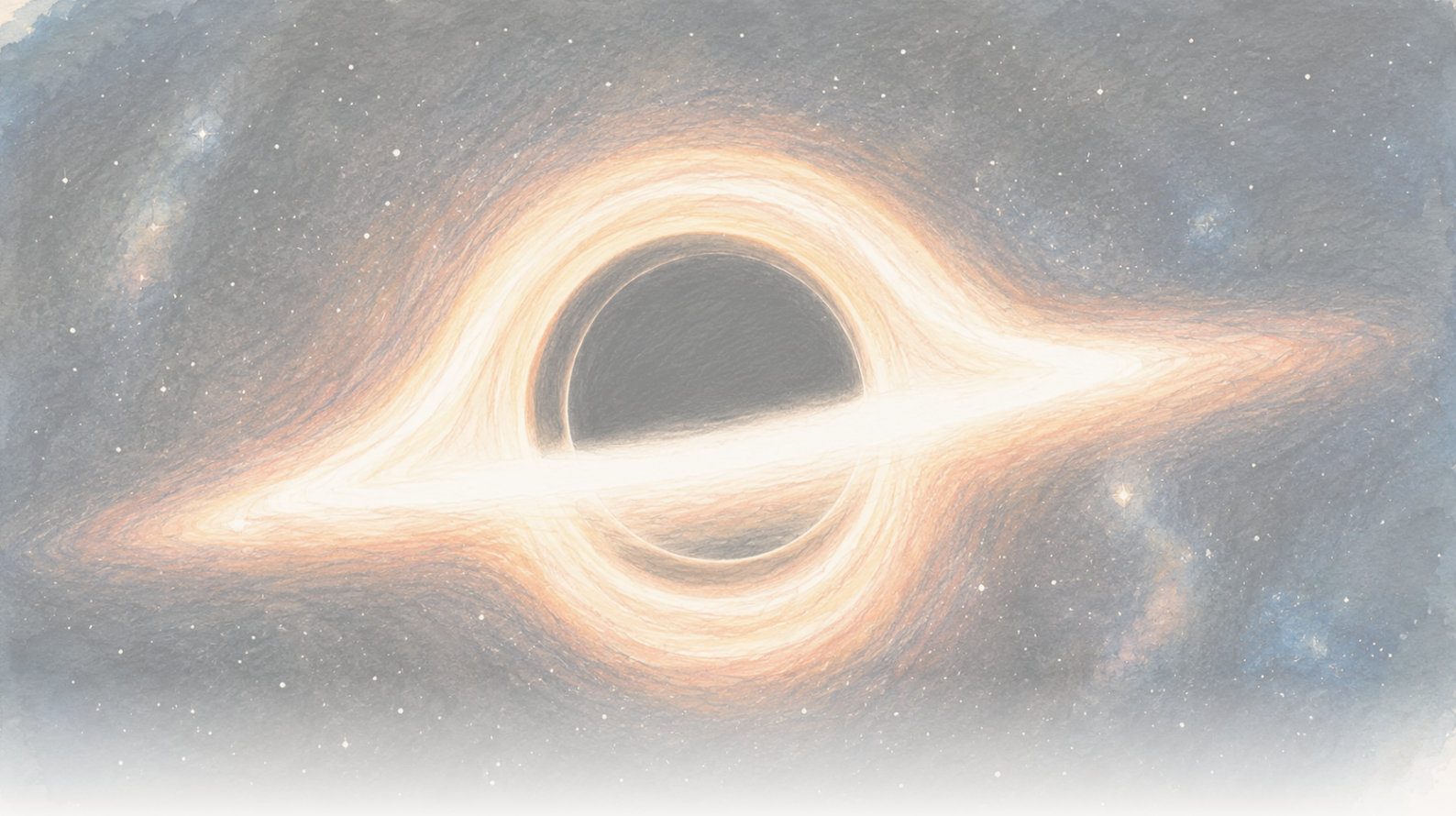




The CLEAN PAPER

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

黑洞遵守類似熱力學的「定律」——新結果把它們推廣到劇烈遠離平衡的黑洞

自 20 世紀 70 年代以來，人們已經知道黑洞遵守一組與熱力學相呼應的定律，但最整潔的版本只適用於安靜處在平衡態的黑洞。一篇新的 *Physical Review Letters* 論文借助局域定義的「動力學視界」，把第一和第二定律推廣到快速變化的黑洞——吞噬物質、並合、輻射或振鈴衰減中的黑洞。這樣，即便黑洞正在劇烈演化，也可以給它定義溫度和熵。這是經典廣義相對論中的數學結果，不是新的量子重力，不是觀測，也沒有解決黑洞資訊難題。

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

黑洞有一套看起來像熱力學的「定律」。但最整潔的版本，只在什麼都沒發生時才好用

物理學中最奇怪的事實之一，是黑洞竟然像有溫度的物體。20 世紀 70 年代初，貝肯斯坦和霍金發現，支配黑洞的方程與熱力學定律幾乎可以逐項對應：黑洞的熵與視界面積成正比，溫度與表面重力成正比。隨後霍金進一步證明，這個溫度並不只是形式上的類比——從最深層意義上說，黑洞確實會發出極其微弱的熱輻射。

什麼是霍金輻射？

在經典理論裡，沒有任何東西能從黑洞逃出去，因此黑洞理應完全「黑」，也談不上有什麼溫度。但斯蒂芬·霍金在 1974 年證明，一旦在視界附近納入量子理論，情況就會改變：黑洞會發出微弱的熱輻射，因此慢慢失去質量，也就是「蒸發」。其源頭譜在霍金溫度下是熱譜，而輻射穿過彎曲時空傳播時，又會進一步改變最終到達無窮遠處的譜形。一個常見的啟發式圖像——並不是霍金真正的推導——是視界外的量子漲落產生粒子對，其中一個夥伴逃出去成為輻射，另一個落入黑洞。

關鍵特徵是，這個溫度與黑洞質量成反比：黑洞越小，溫度越高。對任何望遠鏡有可能看見的天體黑洞而言，這個溫度都低得驚人——遠低於周圍空曠宇宙的溫度——所以實際輻射完全可以忽略，也從未被直接測到。它的重要性在概念上：霍金輻射把「黑洞力學與熱力學之間的類比」變成了真正的熱力學對應。既然黑洞確實有溫度，那麼這些定律中的「溫度」和「熵」就是實際的熱力學量，而不只是形式上的巧合。（這只是本文論文的背景，不是它的新結果。）

這種對應關係的核心，是所謂的黑洞力學**第一定律**，由 Bardeen、Carter 和霍金在 1973 年提出。用語言描述就是：如果把一個黑洞從某個穩定狀態輕輕擾動到附近另一個穩定狀態，它的質量變化等於溫度乘以熵的變化，再加上一個與自旋有關的項。它相當於黑洞版的「熱量變化等於溫度乘以熵變」。

問題藏在「附近的穩定狀態」這幾個字裡。1973 年那條乾淨的定律比較的是兩個靜靜待在平衡態的黑洞，而且兩者之間只差一個無窮小變化。它其實從來沒有描述一個真正的**過程**——例如黑洞吞下一顆恆星、兩個黑洞並合，或一個剛誕生的黑洞在劇烈擾動後振鈴衰減。而這些恰恰是我們最想理解的情形，也恰恰與「安靜地待著」相反。黑洞最有趣時，那條整潔定律反而說不出話。

為什麼最直觀的修補辦法行不通

你可能會覺得修補很簡單：物質掉進去時，直接看視界怎樣變大不就行了？問題在於——看哪一種視界？

大多數人腦中想像的，是**事件視界**，也就是那條真正的「有去無回」邊界。但事件視界有一個微妙又麻煩的性質：它的定義依賴整個宇宙的未來。要知道事件視界此刻在哪裡，你原則上必須知道從現在開始直到永遠，究竟還有什麼東西會落進去。這並不是一個可以忽略的技術細節。即使某個區域現在完全空無一物、局部還是平直時空，只要未來注定有物質在那裡形成黑洞，事件視界就可能在那批物質真正到來之前已經開始增長。於是，局部什麼都沒發生，視界面積卻能變大。

為什麼物質還沒到，視界就能先長起來？

這個問題的科學名稱是事件視界的目的論性質（**teleological nature**），也常說它具有**全域定義**。這裡「目的論」不是說視界有某種目的、能預測未來，或會把影響從未來倒著傳回過去。它的意思是：某個事件究竟是否落在視界以內，只有知道完整的未來時空歷史後才能判斷。

形式定義只是把同一件事說得更緊湊。想像**未來類光無窮遠**——通常讀作「I-plus」，寫作 $\mathcal{I}^+$ ——它代表那些永遠逃離、最終抵達無限遙遠未來的光所到達的終點。事件視界就是這樣一條邊界：邊界外的事件可以發出向外的光，最終到達 $\mathcal{I}^+$ ；邊界內的事件則永遠做不到。在廣義相對論的標準記號中，它是未來類光無窮遠的因果過去的邊界： $\partial\mathcal{J}^-(\mathcal{I}^+)$ 。因為「永遠不能到達」這層意思已經寫進定義，僅憑此時此地的測量就不可能精確定位事件視界。

一個塌縮的球殼能把這種怪異直觀地顯示出來。在球殼到來之前，它內部可以是空的，而且局部完全平直。假設從中心在越來越晚的時刻不斷向外發射光線：較早發出的光能逃出去；較晚發出的光則會遇到正在塌縮的球殼，進入一種再也逃不出的幾何。事件視界就是把這兩種結局分開的邊界。把這條邊界沿時間向後追蹤，它會從中心開始，在球殼還沒有抵達時，就已經穿過仍然空曠、平直的內部區域向外擴展。這個面積增長並不是在那裡記錄了任何局部物質流，而是在完整時空中記錄「哪些逃逸路徑最終還保持開放」。

整個圖景裡沒有任何東西倒著作用於時間。如果球殼後來被偏轉，黑洞根本沒有形成，那麼完整時空就會不同，先前那塊區域也不會屬於某個事件視界。這裡的教訓不是「未來改變過去」，而是事件視界是一條**全域因果邊界**，而不是附近觀察者能在某一個瞬間直接偵測到的表面。也正因如此，當物理學家需要跟蹤一個正在變化的黑洞時，會使用準局域視界或動力學視界。

這使事件視界很難用來即時記錄黑洞的「狀態」。在電腦模擬中，你甚至往往要等整個模擬結束後才能確定事件視界在哪裡，更不用說用它逐時刻追蹤溫度或熵了。

關鍵一步：使用一種可以局域定義的視界

Abhay Ashtekar、Daniel Paraizo 和 Jonathan Shu 的新論文採用另一種視界概念——一種**準局域視界**。它只由自身鄰域中的幾何定義，不需要知道無限遙遠的未來。這些「動力學視界片段」正是數值相對論研究者在黑洞並合模擬中已經使用的表面，因為它們既局域又「誠實」：只有當能量真的穿過這些表面時，它們的面積才會增長。

接下來，作者解決了問題更難的一半。在普通熱力學中，遠離平衡的系統很難處理：溫度、壓強這類量通常只有在系統足夠接近平衡時才能幹淨地定義成一個單一數值。黑洞也有同樣麻煩——除非像作者這樣利用廣義相對論的一個特殊性質。處於平衡態的黑洞，也就是克爾黑洞，只需要兩個數就能完全確定：它的大小和自旋。因此，作者構造了一個映射：無論一個視界正在多麼劇烈地演化、遠離平衡，在每一個瞬間，都給它找出「此刻最像的平衡黑洞」的那兩個參數。借助這張映射，即便黑洞正在猛烈變化，也可以給它指定一個**隨時間變化的溫度和自旋**。

有了這兩部分——局域定義的能量穿過視界，以及瞬時熱力學量——作者把第一定律推廣到了任意遠離平衡的黑洞。最關鍵的是，新定律描述的是由真實物理過程造成的**有限變化**（物質和重力波穿越視界），而不是兩個凍結狀態之間的無窮小差異。他們還給出與之配套的第二定律，而且現在它是定量的：視界面積增加多少，直接與流入的能量聯繫起來。把第一、第二定律放在一起，得到一個簡潔結論——即便黑洞正處於能想像到的最劇烈事件中，衡量其熵的正確量仍然是視界面積。

這項研究不能證明什麼

- 它**沒有**解決量子重力。這是經典廣義相對論中的結果，並採用了「視界面積對應熵」的標準識別。它並沒有從更基本的理論推導出這種熵。
- 它**沒有**計算微觀態，也沒有解釋黑洞熵究竟「由什麼組成」。它擴展的是黑洞熱力學中宏觀量之間的關係，並沒有進一步給出微觀自由度的構成。
- 它**沒有**解決黑洞資訊悖論。那個難題屬於量子理論；這篇論文沒有觸及它。
- 它**不**是一次觀測或測量。沒有望遠鏡、沒有資料，也沒有重力波訊號參與證明——這是數學。這裡說「正在並合黑洞的溫度」，指的是方程中精確定義的量，不是拿溫度計能讀出來的東西。
- 它**沒有**推翻貝肯斯坦和霍金。它是在原來只適用於平衡態的框架無話可說之處，把他們的圖景推廣到動力學區域。

證據有多強？

就它本身的性質而言，很強：這是一個領域頂尖團隊完成的、嚴謹且內部一致的數學物理結果，並作為 *Editors' Suggestion* 發表在 *Physical Review Letters*；另有一篇配套論文給出更長的推導。

真正需要誠實說明的限制，主要是結果屬於什麼類型，而不是研究質量問題：

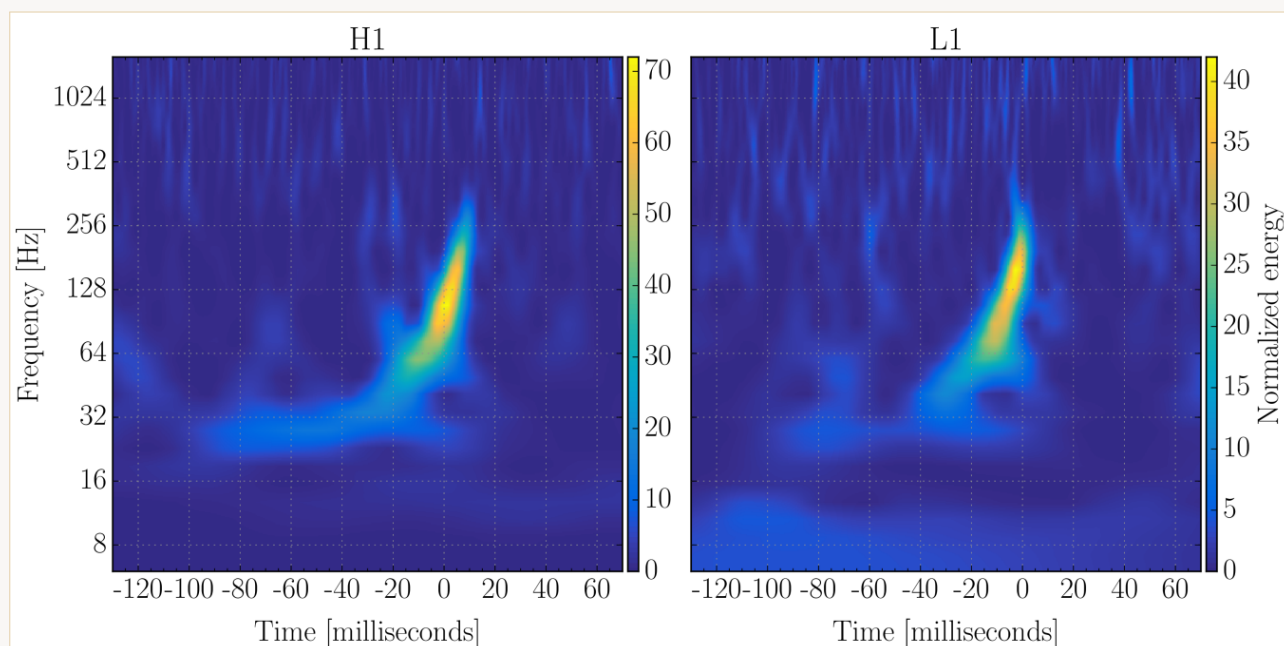
- 它建立在傳統假設上：視界面積就是熵（面積除以包含牛頓常數和普朗克常數的標準因子）。如果未來完整的量子重力理論修改了這種對應關係，那麼這裡的熱力學解釋也會隨之調整。
- 論文的主計算針對最常見的情形展開（類空動力學視界、軸對稱）；作者認為這些限制並非本質，但完全一般的表述還依賴其他工作的結果。
- 「即使遠離平衡，熵也等於視界面積」是一個被新第一、第二定律強烈支持、因而顯得很自然的識別；它不是從微觀統計直接推出來的定理。

所以，這是一套五十年框架的嚴格推廣，不是實驗發現，也不是一條新自然定律等著實驗驗證。

為什麼重要

有兩個理由，一個實用，一個概念性。

實用上，我們現在真正研究的黑洞——例如 LIGO 和 Virgo 聽到的並合黑洞——在最關鍵的時刻都遠離平衡。這篇論文中的物理量正是從數值模擬已經在追蹤的局域視界構造出來，因此現在有了一種有原則的方法，可以討論黑洞在並合或塌縮過程中的熵和溫度，而不只是過程之前和之後。



GW150914 是人類首次直接偵測到的重力波訊號，來自兩個黑洞並合。這兩幅時頻圖分別顯示 LIGO Hanford（左）和 LIGO Livingston（右）的訊號：在兩個偵測器中，明亮軌跡都隨著訊號頻率在接近並合時快速升高。這是真實的遠離平衡黑洞系統示例，用來提供新熱力學框架的背景；它並不是該框架的觀測證據。

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

概念上，黑洞的熱力學行為是我們少數幾個關於量子重力的具體線索之一——在那裡，重力、量子理論和熱力學明顯碰到了一起。把一個劇烈變化黑洞的「熵」和「溫度」究竟是什麼意思說得更精確，就等於把未來任何量子重力理論必須命中的靶心畫得更清楚。它沒有回答黑洞熵到底是什麼這個深層問題，卻把問題本身寫得更精確——在這個物理學角落裡，這往往已經是大半工作。

重點摘要

黑洞遵守一套與熱力學相呼應的定律，但 1973 年那個最整潔的「第一定律」只比較靜止在平衡態的黑洞，無法描述真實過程。Ashtekar、Paraizo 和 Shu 使用局域定義的「動力學視界」，再透過一個映射給變化中的黑洞指定瞬時溫度和自旋，把第一、第二定律都推廣到任意遠離平衡的黑洞——包括並合、吸積和振鈴衰減中的黑洞。結果是，即便發生劇烈事件，視界面積仍然是衡量黑洞熵的合適量。這是經典廣義相對論中的嚴格結果，不是量子重力，不是觀測，不是微觀態計數，也沒有解決資訊悖論。

務實檢視

論文真正顯示了什麼：一套數學上自洽的推廣，把黑洞力學第一、第二定律擴展到完全動力學、遠離平衡的黑洞，並以準局域動力學視界為基礎。它定義了一個針對有限真實過程的第一定律和一個定量第二定律，使「動力學黑洞的熵由視界面積衡量」成為很自然的識別。

真實但屬於解釋的部分：在遠離平衡時仍把「熵 = 視界面積」。新定律讓這種識別很有說服力，但它繼承了經典框架中標準的面積—熵假設，而不是從更基礎理論推導出來。

論文沒有顯示什麼：一套量子重力理論；黑洞熵的微觀起源或「計數」；資訊悖論的解決；任何觀測或實驗結果；或一個能實際測量的黑洞溫度。

主要侷限：全程使用經典廣義相對論；主結果嚴格推導於常見的類空、軸對稱情形，更一般性依賴配套工作論證；面積—熵識別是採用的前提，並非從統計力學中證明。

普通讀者應該有多大信心？可以高度相信這是一項扎實、受到重視的理論進展，確實把黑洞熱力學推廣到了動力學區域。同樣也可以高度確信：它不是新觀測，不是量子重力，更不是著名資訊難題的解決方案。最合適的理解是：這是用粉筆而不是望遠鏡邁出的一步真實進展。

來源

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

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