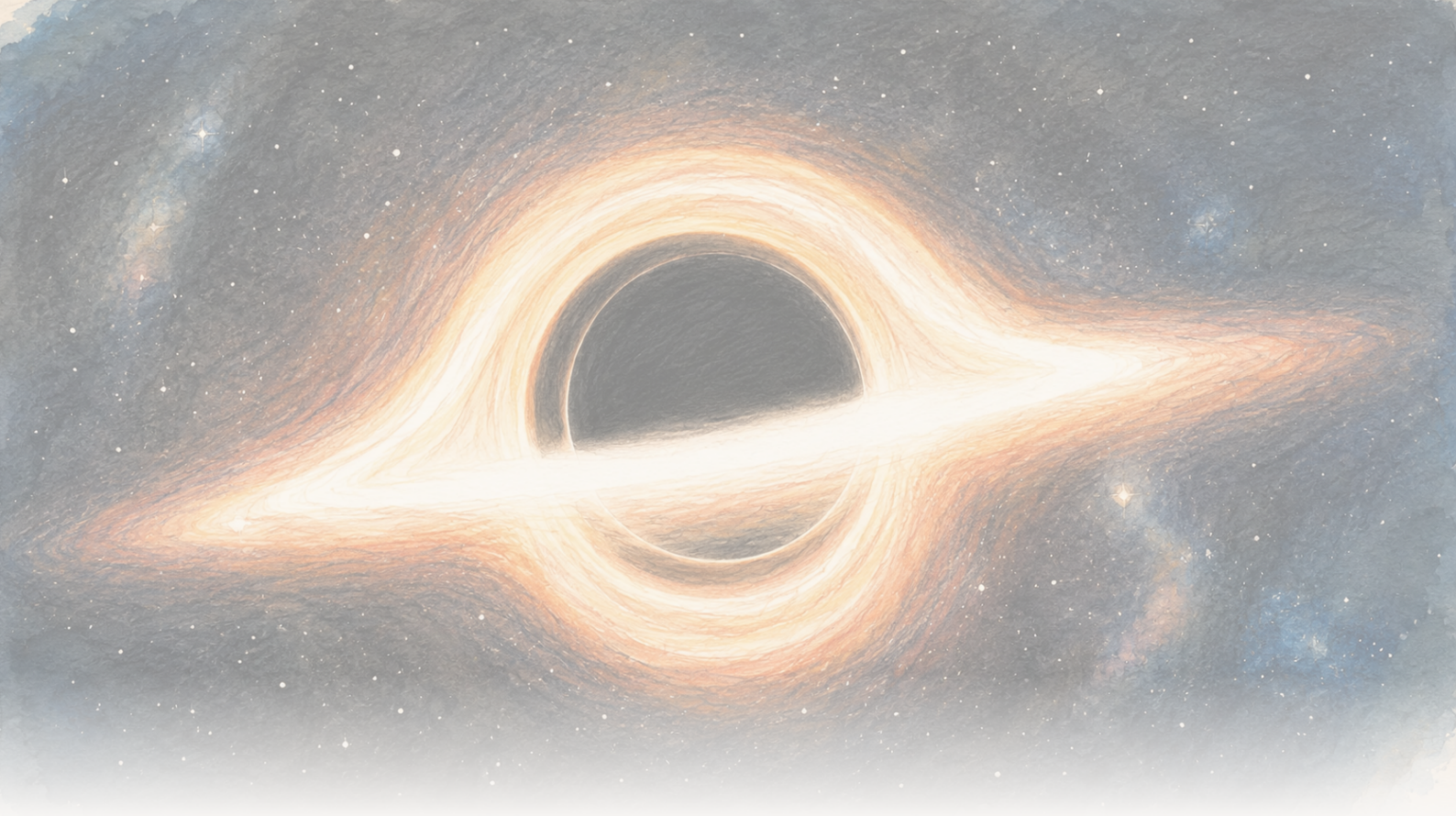




The CLEAN PAPER

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套與熱力學相呼應的定律，但最簡潔的版本只適用於安靜地處於平衡態的黑洞。一篇新的 *Physical Review Letters* 論文將第一和第二定律推廣到準局域視界中滿足動力學視界片段條件、且可以任意遠離平衡的部分——涵蓋吸積、塌縮和黑洞併合的大部分階段。模擬會在整個併合過程中追蹤準局域視界，但當它不是動力學視界片段時，這些定律尚未涵蓋合併時刻附近的一小段時間。核心框架屬於廣義相對論，對蒸發的應用則採用半經典近似；它不是新的量子重力，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 的新論文將其結果建立在另一種視界概念上——一種**準局域視界**，它僅由自身鄰域內的幾何定義，無須參照無限遙遠的未來。這些**準局域視界**正是數值相對論研究者在整個模擬過程中用來定位前身黑洞、追蹤併合並定位併合後遺留黑洞的表面。本文發展的熱力學定律適用於準局域視界中滿足額外條件、可構成**動力學視界片段**的部分。在每個這類片段上，視界面積會直接回應局域能量通量而變化，而不是回應遙遠未來的事件：正能量流入時，面積增大；對於具有負能量通量、正在蒸發的類時視界，面積則減小。

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明確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，取動力學視界片段上的每個狀態，並在該片段的每個截面讀出這個狀態當下所類似的平衡黑洞的兩個參數。借助這個映射，即便黑洞正在猛烈變化，也可以沿該片段為它指定**隨時間變化的溫度和自旋**。

藉助這些要素——穿過視界的局域定義能量和瞬時強度量——作者將第一定律推廣到任意遠離平衡的黑洞。關鍵在於，新定律描述的是**真實物理過程造成的有限變化**（物質和重力波穿過視界），而不是兩個凍結狀態之間的無窮小步驟。他們還給出了與之匹配的第二定律，其表述如今是定量的：視界面

積的變化與局域能量通量直接相關——正能量流入時增大，負通量作用於正在蒸發的類時視界時則減小。第一和第二定律合在一起指向一個清晰的結論：對於由動力學視界片段表徵的任何階段，無論多麼劇烈，熵的正確度量仍是其視界面積。

這項研究不能證明什麼

- 它**沒有**解決量子重力。核心框架以廣義相對論表述；將其應用於黑洞蒸發時使用半經典近似，其中量子物質場作用於經典時空。它仍然把視界面積與熵的標準對應關係作為假設，而不是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**觀測或測量。其中不涉及望遠鏡、資料或重力波訊號——這是數學。黑洞演化時賦予動力學視界的「溫度」是方程中精確定義的量，並不是可以從溫度計上讀出的數值。
- 它**尚不能**對兩個黑洞的整個合併過程給出連續的熱力學描述。數值模擬會在完整演化中追蹤準局域視界——從前身黑洞、經過併合，直到併合後的遺留黑洞——但在極接近併合的一小段時間內，該視界不再滿足動力學視界片段所要求的條件。配套論文指出，對這段時間的熱力學描述仍在研究之中。
- 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？

就其性質而言，證據很強：這是該領域一個領先團隊完成的、嚴謹且內部一致的數學物理工作，並作為 *Editors' Suggestion* 發表在 *Physical Review Letters* 上。一篇經過同儕審查的配套論文給出了更詳細的推導，並處理了短篇論文為精簡篇幅而略去的情形。

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：

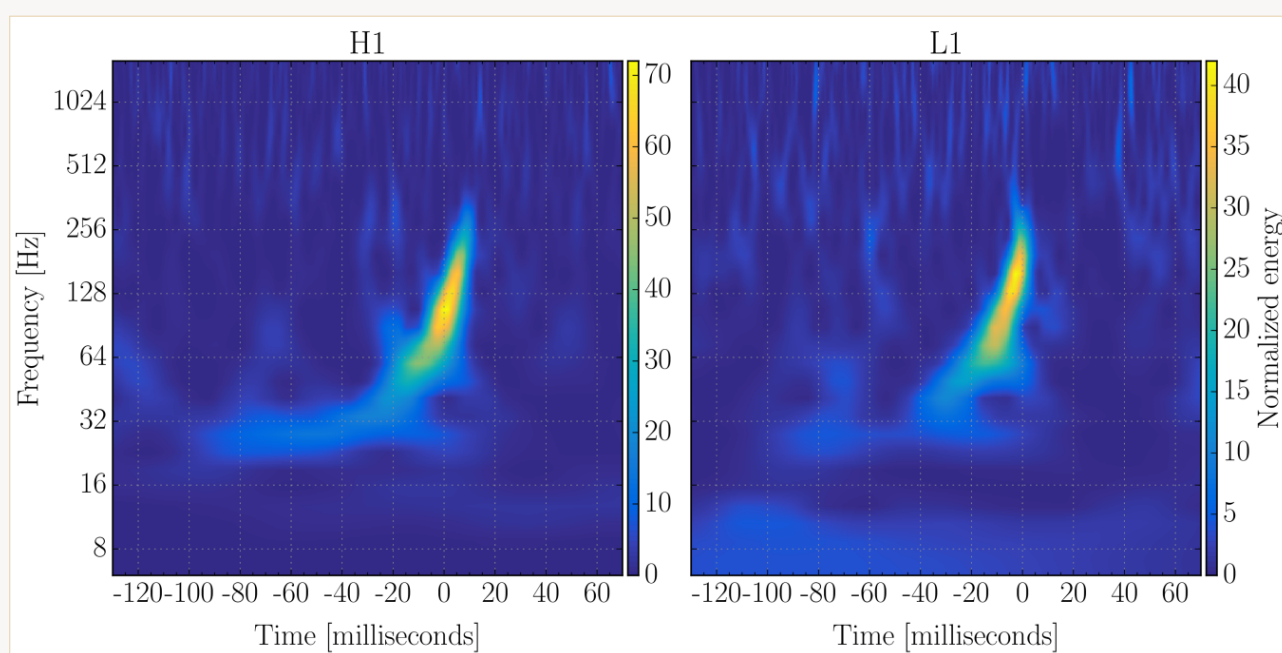
- 它建立在傳統假設上：視界面積就是熵（面積除以包含牛頓常數和普朗克常數的標準因子）。如果未來完整的量子重力理論修改了這種對應關係，那麼這裡的熱力學解釋也會隨之調整。
- 為了簡潔明瞭，這篇短篇論文使用軸對稱的類空動力學視界來呈現主要推導。經過同儕審查的配套論文明確分析了類時動力學視界，並在沒有旋轉 *Killing* 場的情況下構造了角動量。不過，對於正在蒸發的類時視界，其顯式反作用處理僅限於球對稱情形。
- 「即使遠離平衡，熵也等於視界面積」是一個被新第一、第二定律強烈支持、因而顯得很自然的識別；它不是從微觀統計直接推出來的定理。

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。

從實際角度看，我們目前真正研究的黑洞——LIGO 和 Virgo 所聽到的正在併合的黑洞——在最關鍵的時刻都遠離平衡。模擬會從前身黑洞、經過併合，直到遺留黑洞，持續追蹤準局域視界。這篇論文中的物理量適用於該視界中滿足條件、可構成動力學視界片段的部分，因此為討論黑洞在併合演化的大部分階段以及塌縮過程中的熵和溫度提供了一種有原則的方法，而不再侷限於一切都穩定下來之後。在緊鄰合併時刻的一小段時間內，準局域視界仍受到追蹤，但不在目前的熱力學描述之內。



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，但簡潔的 1973 年「第一定律」只比較處於靜止平衡態的黑洞，無法描述真實過程。Ashtekar、Paraizo 和 Shu 使用準局域視界，將熱力學定律應用於其中的動力學視界片段，並構造一個為這些片段上每個狀態賦予瞬時溫度和自旋的映射，藉此把第一和第二定律推廣到任意遠離平衡的黑洞——包括正在吸積、塌縮、振鈴衰減以及經歷併合大部分階段的黑洞。結論

是，對於由動力學視界片段表徵的每個階段，視界面積仍是熵的正確度量。極接近合併的一小段時間尚未被這套熱力學描述涵蓋，儘管模擬仍持續追蹤準局域視界。核心框架屬於廣義相對論，對蒸發的應用則採用半經典近似；它不是量子重力，不是觀測，不是微觀態計數，也不是資訊悖論的解答。

務實檢視

論文真正顯示了什麼：一套數學上自治的推廣，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，並以準局域視界及其中滿足動力學視界片段條件的部分為基礎。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：核心推導基於廣義相對論，而類時蒸發的應用採用半經典近似；極接近雙黑洞合併的一小段時間無法由動力學視界片段表徵，其熱力學描述仍在研究之中，儘管數值模擬仍持續追蹤準局域視界；對正在蒸發的類時視界所作的顯式反作用處理僅限於球對稱情形；面積—熵對應關係是預設，而非由統計力學證明。

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。

發布後更新

• 更正 · 2026-08-27

在收到通訊作者 Abhay Ashtekar 的回饋後，我們更正了兩處表述：原文曾稱，經過同儕審查的配套論文只是論證了類時和非軸對稱情形，而沒有明確處理它們。在審閱過程中，我們還釐清了該框架尚未涵蓋極接近雙黑洞合併的一小段時間；在這段時間內，準局域視界不滿足動力學視界片段所要求的條件。

• 更正 · 2026-08-28

根據通訊作者 Abhay Ashtekar 的進一步澄清，我們區分了數值模擬從前身黑洞、經過併合直到遺留黑洞都持續追蹤的準局域視界，以及其中滿足額外條件、可構成動力學視界片段並適用熱力學定律的部分。

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>

Ashtekar, Paraizo & Shu, Thermodynamics of dynamical black holes beyond perturbation theory, Gen. Relativ. Gravit. 58, 91 (2026)

<https://doi.org/10.1007/s10714-026-03585-4>