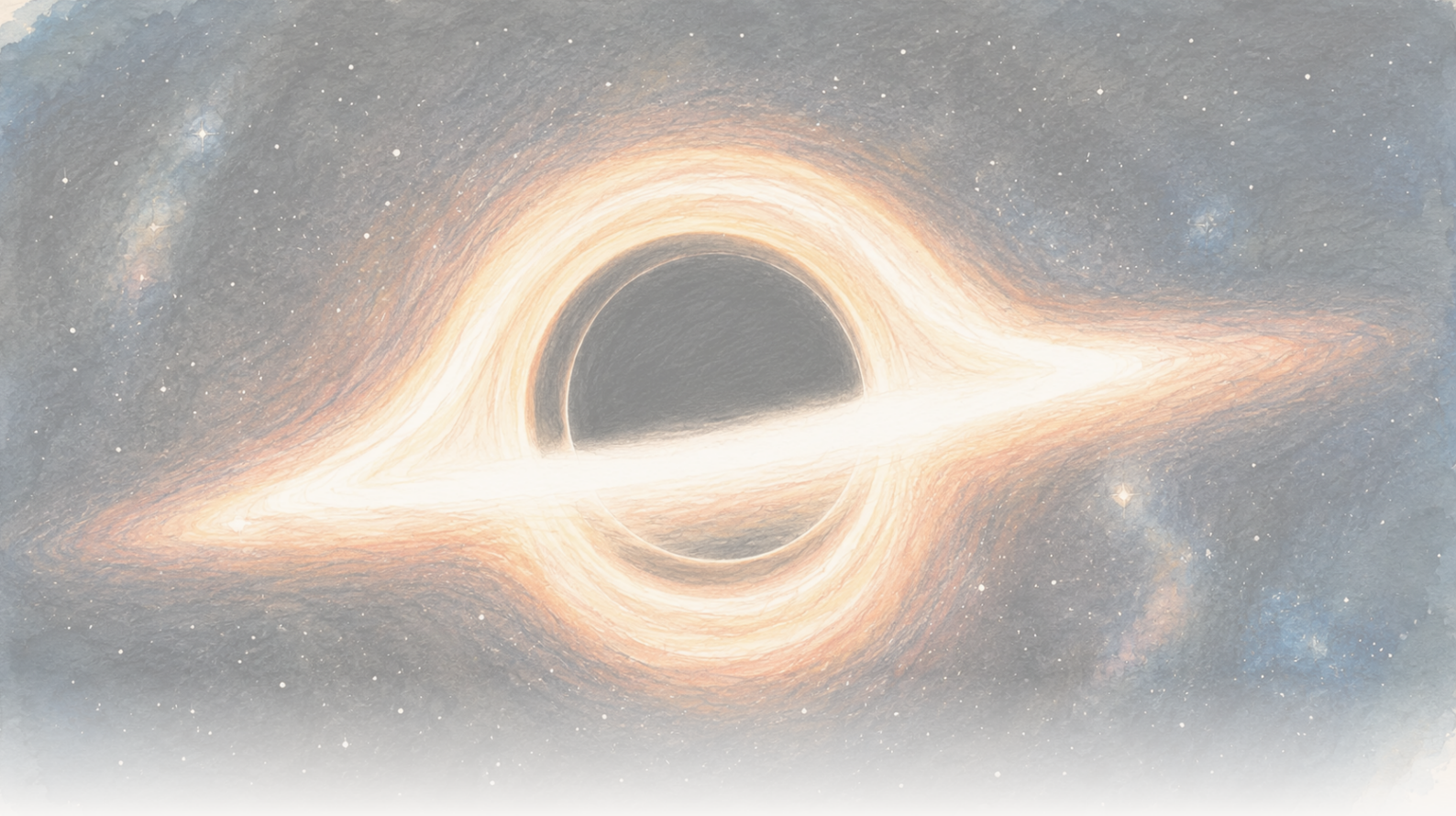




The CLEAN PAPER

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

หลุมดำมีกฎแบบอุณหพลศาสตร์ — ผลใหม่ขยายกฎเหล่านี้ ไปยังหลุมดำที่อยู่ไกลจากสมดุลอย่างรุนแรง

นับตั้งแต่ทศวรรษ 1970 เราทราบว่าหลุมดำเป็นไปตามกฎที่คล้ายคลึงกับอุณหพลศาสตร์ แต่รูปแบบที่กระชับชัดเจนที่สุด
ใช้ได้เฉพาะกับหลุมดำที่อยู่หนึ่งในสมดุล บทความใหม่ใน *Physical Review Letters* ขยายกฎข้อที่หนึ่งและสองไปสู่ส่วน
ของขอบฟ้าถึงเฉพาะที่ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นช่วงขอบฟ้าพลวัตและอยู่ห่างจากสมดุลได้มากเพียงใดก็ได้ — ระหว่างการสะสม
มวล การยุบตัว และช่วงส่วนใหญ่ของการรวมตัวของหลุมดำ การจำลองติดตามขอบฟ้าถึงเฉพาะที่ตลอดการรวมตัว แต่กฎ
เหล่านี้ยังไม่ครอบคลุมช่วงเวลาสั้น ๆ รอบการรวมตัวเมื่อขอบฟ้านั้นไม่ใช่ช่วงขอบฟ้าพลวัต กรอบหลักอยู่ในทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป โดยมีการประยุกต์แบบกึ่งคลาสสิกกับการระเหย งานนี้ไม่ใช่แรงโน้มถ่วงควอนตัมแบบใหม่ ไม่ใช่การสังเกต
และไม่ใช้การคัดลอกปริศนาข้อมูลของหลุมดำ

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

หลุมดำมีกฎที่ดูเหมือนอุณหพลศาสตร์ แต่ฉบับเรียบร้อยใช้ได้เฉพาะตอนที่ไม่มีอะไรเกิดขึ้น

ข้อเท็จจริงที่ประหลาดที่สุดอย่างหนึ่งในฟิสิกส์คือหลุมดำประพฤติตัวเหมือนวัตถุร้อน ในช่วงต้นทศวรรษ 1970 Bekenstein และ Hawking สังเกตว่าสมการที่ควบคุมหลุมดำเรียงตัวตรงกับกฎอุณหพลศาสตร์แทบที่ละพจน์: หลุมดำมีเอนโทรปีแปรผันตามพื้นที่ขอบฟ้าของมัน และมีอุณหภูมิแปรผันตามความโน้มถ่วงที่ผิว จากนั้น Hawking แสดงว่าอุณหภูมินั้น “จริง” ในความหมายที่ลึกที่สุด — หลุมดำเปล่งรังสีความร้อนออกมาจริงๆ

รังสีฮอว์กิงคืออะไร?

ตามฟิสิกส์คลาสสิก ไม่มีอะไรหนีออกจากหลุมดำได้ ดังนั้นมันควรดำสนิทและไม่มีอุณหภูมิเลย แต่ในปี 1974 Stephen Hawking แสดงว่าภาพนี้เปลี่ยนไปเมื่อรวมทฤษฎีควอนตัมกับกลศาสตร์ของหลุมดำ: หลุมดำปล่อยแสงเรืองความร้อนจาง ๆ และจาง ๆ สูญเสียมวล หรือ “ระเหย” สเปกตรัมเป็นแบบความร้อนที่อุณหภูมิ Hawking ขณะที่การแพร่ผ่านปริภูมิ-เวลาโค้งเปลี่ยนรังสีที่ไปถึงอนันต์ ในภาพอธิบายเชิงสัญชาตญาณที่พบบ่อย — ไม่ใช่การอนุมานจริงของ Hawking — ความผันผวนควอนตัมด้านนอกขอบฟ้าสร้างคู่อนุภาค โดยตัวหนึ่งหนีออกไปเป็นรังสีและอีกตัวตกเข้าไป

คุณสมบัติสำคัญคืออุณหภูมิแปรผกผันกับมวลของหลุมดำ: หลุมดำยิ่งเล็กยิ่งร้อน สำหรับหลุมดำใด ๆ ที่กล้องโทรทรรศน์พอมองเห็นได้ อุณหภูมิต่ำอย่างเหลือเชื่อ — ต่ำกว่าปริภูมิว่างรอบมันมาก — ดังนั้นในทางปฏิบัติแสงเรืองนี้เล็กจนมองข้ามได้และยังไม่เคยวัดโดยตรง ความสำคัญของมันเป็นเชิงแนวคิด: รังสี Hawking คือสิ่งที่เปลี่ยน *ความคล้ายคลึง* ระหว่างกลศาสตร์หลุมดำกับอุณหพลศาสตร์ให้กลายเป็นอุณหพลศาสตร์จริง เพราะหลุมดำมีอุณหภูมิจริง “อุณหภูมิ” และ “เอนโทรปี” ในกฎเหล่านี้จึงเป็นปริมาณอุณหพลศาสตร์จริง ไม่ใช่เพียงความบังเอิญเชิงรูปแบบ (นี่เป็นพื้นหลังของบทความปัจจุบัน ไม่ใช่ผลลัพธ์ของบทความ)

ความสอดคล้องนี้ยึดอยู่กับผลที่เรียกว่า **กฎข้อที่หนึ่งของกลศาสตร์หลุมดำ** (Bardeen, Carter และ Hawking, 1973) กล่าวเป็นคำได้ว่า: ถ้ารวบหลุมดำจากสภาวะคงตัวหนึ่งไปยังสภาวะคงตัวใกล้เคียง การเปลี่ยนแปลงมวลของมันจะเท่ากับอุณหภูมิคูณการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี บวกพจน์ที่เกี่ยวกับสปิน มันคือเวอร์ชันหลุมดำของแนวคิดที่ว่า “ความร้อนที่เข้าเท่ากับอุณหภูมิคูณการเปลี่ยนแปลงเอนโทรปี”

แต่มีปัญหาซ่อนอยู่ในคำว่า *สภาวะคงตัวใกล้เคียง* กฎฉบับเรียบร้อยปี 1973 เปรียบเทียบหลุมดำสองหลุมที่อยู่หนึ่งในสมดุลและต่างกันเพียงเล็กน้อย มันไม่ได้อธิบาย **กระบวนการ** จริง ๆ เลย — หลุมดำกลืนดาวฤกษ์ หลุมดำสองหลุมรวมกัน หรือหลุมดำเกิดใหม่ที่สั่นลดลงหลังการกำเนิดรุนแรง สถานการณ์เหล่านี้ต่างหากที่เราอยากเข้าใจมากที่สุด และตรงข้ามกับ “อยู่หนึ่ง ๆ” อย่างสิ้นเชิง กฎที่เรียบร้อยกลับเจียบพอดีตอนที่หลุมดำน่าสนใจที่สุด

ทำไมวิธีแก้ที่ดูตรงไปตรงมาจึงใช้ไม่ได้

คุณอาจคิดว่าวิธีแก้ง่ายมาก: แค่ดูขอบฟ้าโตเมื่อสสารตกเข้าไป ปัญหาคือ **ขอบฟ้าแบบไหน**

ขอบฟ้าที่คนส่วนใหญ่นึกภาพ — **event horizon** หรือเส้นแบ่งจุดไม่หวนกลับจริง — มีคุณสมบัติที่ละเอียดอ่อนและน่าปวดหัว: มันถูกนิยามด้วยอนาคตทั้งหมดของจักรวาล ถ้าจะรู้ว่า event horizon อยู่ตรงไหน *ตอนนี้* คุณต้องรู้ทุกสิ่งที่จะตกเข้าไปในหลุมดำไปตลอดอนาคต นี่ไม่ใช่รายละเอียดทางเทคนิคเล็ก ๆ Event horizon สามารถเริ่มได้ในบริเวณปริภูมิที่ว่างเปล่าและแบนสนิท *ก่อน* ที่สสารซึ่งจะบ่อนหลุมดำจะมาถึง เพียงเพราะสสารนั้นถูกกำหนดว่าจะมาถึงภายหลัง พื้นที่ของมันจึงเพิ่มขึ้นได้ในบริเวณที่เฉพาะที่แล้วไม่มีอะไรเกิดขึ้นเลย

ขอบฟ้าโตได้อย่างไรก่อนสสารมาถึง?

ชื่อทางวิทยาศาสตร์ของปัญหานี้คือ **ลักษณะเชิง teleological ของ event horizon** หรือเรียกอีกอย่างว่า **นิยามแบบ global** ในที่นี้ “teleological” ไม่ได้หมายความว่าขอบฟ้ามีจุดมุ่งหมาย ทำนายอนาคต หรือส่งอิทธิพลย้อนเวลา แต่หมายถึงว่าเหตุการณ์หนึ่งอยู่ด้านในขอบฟ้าหรือไม่ สามารถตัดสินได้เฉพาะจากประวัติอนาคตทั้งหมดของปริภูมิ-เวลานิยามเชิงรูปแบบพูดเรื่องเดียวกันอย่างกระชับกว่า ลองนึกถึง **future null infinity** — เรียก “ไอฟลัส” และเขียน $\mathcal{I}^+$ — เป็นปลายทางที่แสงซึ่งหนีไปตลอดกาลเดินทางถึงในอนาคตที่ว่างเปล่าและไกลอนันต์ Event horizon คือขอบเขตระหว่างเหตุการณ์ที่สัญญาณแสงซึ่งส่งออกไปสามารถไปถึงปลายทางนั้นได้ในที่สุด กับเหตุการณ์ที่ไม่มีสัญญาณดังกล่าวหนีถึงได้เลย ในสัญกรณ์มาตรฐานของทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป มันคือขอบของ causal past ของ future null infinity: $\partial J^-(\mathcal{I}^+)$ เพราะคำว่า *ตลอดไป* ฝังอยู่ในนิยาม จึงไม่มีการวัดเฉพาะที่นี้และตอนหนึ่งที่ระบุตำแหน่ง event horizon ได้อย่างแม่นยำ

เปลือกทรงกลมที่ยุบตัวทำให้ความแปลกนี้เห็นชัด ก่อนเปลือกจะมาถึง บริเวณด้านในอวกาศว่างและแบนในระดับเฉพาะที่ ส่งลำแสงออกจากศูนย์กลางในเวลาที่ยาวที่ละน้อย: ลำแสงก่อนหน้าหนีออกได้ ส่วนลำแสงที่ส่งทีหลังไปเจอเปลือกที่กำลังยุบในเรขาคณิตที่ไม่สามารถหนีออกได้ Event horizon คือขอบเขตที่แบ่งสองผลลัพธ์นั้น เมื่อตามเส้นขอบนี้ย้อนกลับ มันเริ่มจากศูนย์กลางและขยายผ่านภายในที่ยาวและแบนก่อนเปลือกจะมาถึง พื้นที่ที่เพิ่มขึ้นไม่ได้รายงานการไหลของสสารเฉพาะที่ใด ๆ ตรงนั้น; มันบันทึกว่าเส้นทางหลบหนีใดยังเปิดอยู่ในปริภูมิ-เวลาทั้งหมดเมื่อดูจบแล้ว ไม่มีอะไรในภาพนี้กระทำย้อนเวลา ถ้าเปลือกถูกเปียงออกและไม่มีหลุมดำเกิดขึ้น ปริภูมิ-เวลาทั้งหมดก็จะต่างออกไป และบริเวณก่อนหน้านั้นก็จะไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งของ event horizon บทเรียนไม่ใช่อนาคตเปลี่ยนอดีต แต่คือ event horizon เป็น **ขอบเขตเชิงเหตุผลแบบ global** ไม่ใช่พื้นผิวที่ผู้สังเกตใด ๆ ตรวจพบได้ในชั่วขณะเดียว นี่คือเหตุผลตรง ๆ ที่นักฟิสิกส์ใช้ขอบฟ้าแบบ quasi-local หรือ dynamical horizon เมื่อต้องติดตามหลุมดำขณะที่มันเปลี่ยนแปลง

คุณสมบัตินี้ทำให้ event horizon แพบไร้ประโยชน์ในฐานะบัญชีแบบเรียลไทม์ของ “สถานะ” หลุมดำ แม้แต่ในการจำลองคอมพิวเตอร์ก็ระบุตำแหน่งมันไม่ได้จนกว่าการจำลองจะจบ และยิ่งใช้ติดตามอนุกรมหรือเอนโทรปีทีละขณะไม่ได้

จุดเปลี่ยน: ใช้ขอบฟ้าที่นิยามได้เฉพาะที่

บทความใหม่โดย Abhay Ashtekar, Daniel Paraizo และ Jonathan Shu วางผลลัพธ์ไว้บนแนวคิดเรื่องขอบฟ้าอีกแบบหนึ่ง — แบบ **กึ่งเฉพาะที่** ซึ่งนิยามด้วยเรขาคณิตในบริเวณใกล้เคียงของตัวมันเองเท่านั้น โดยไม่ต้องอ้างอิงอนาคตอันไกลไม่สิ้นสุด **ขอบฟ้ากึ่งเฉพาะที่** เหล่านี้คือพื้นผิวที่นักสัมพัทธภาพเชิงตัวเลขใช้ระบุตำแหน่งหลุมดำต้นกำเนิด ติดตามการรวมตัว และระบุตำแหน่งหลุมดำที่เหลือหลังการรวมตัวตลอดทั้งการจำลองอยู่แล้ว กฎอุณหภูมิศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นในงานนี้ใช้กับส่วนของขอบฟ้ากึ่งเฉพาะที่ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขเพิ่มเติมของ **ช่วงขอบฟ้าพลวัต** ในแต่ละช่วงดังกล่าว พื้นที่เปลี่ยนแปลงโดยตอบสนองโดยตรงต่อฟลักซ์พลังงานเฉพาะที่ไม่ใช่ต่อเหตุการณ์ในอนาคตอันไกล กล่าวคือ พื้นที่จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีฟลักซ์ไหลเข้าเป็นบวก และจะลดลงในกรณีขอบฟ้าแบบใหม่โลกที่กำลังระเหยและมีฟลักซ์พลังงานเป็นลบ

จากนั้นผู้เขียนแก้ครั้งที่ยากกว่าของปัญหา ในอุณหพลศาสตร์ทั่วไป ระบบที่อยู่ไกลจากสมดุลมักนิยามยากมาก: เราไม่สามารถกำหนดอุณหภูมิหรือความดันเพียงค่าเดียวให้มันอย่างชัดเจน เพราะปริมาณเหล่านั้นนิยามได้ดีเมื่อทุกอย่างเข้าสู่สมดุล หลุมดำก็มีปัญหาเดียวกัน — จนกระทั่งผู้เขียนแสดงว่าสามารถใช้คุณสมบัติพิเศษของทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไปช่วยได้ หลุมดำ ใน สมดุล (หลุมดำ Kerr) ถูกกำหนดด้วยตัวเลขเพียงสองค่า: ขนาดและสปิน ดังนั้นผู้เขียนจึงสร้างการส่งที่รับแต่ละสถานะตามช่วงขอบฟ้าพลวัต และที่ภาคตัดขวางแต่ละส่วนของช่วงนั้นจะอ่านตัวเลขสองค่าของหลุมดำสมดุลที่สถานะนั้นมีลักษณะคล้ายอยู่ชั่วขณะผ่านการส่งนี้ แม้หลุมดำที่กำลังเปลี่ยนอย่างรุนแรงก็สามารถกำหนด **อุณหภูมิและสปินที่ขึ้นกับเวลา** ตามช่วงดังกล่าวได้

ด้วยองค์ประกอบเหล่านั้น — พลังงานที่นิยามเฉพาะที่ซึ่งไหลข้ามขอบฟ้า และปริมาณเข้ม ณ ขณะนั้น — ผู้เขียนขยายกฎข้อที่หนึ่งไปสู่หลุมดำที่อยู่ห่างจากสมดุลได้มากเพียงใดก็ได้ ที่สำคัญ กฎใหม่นี้อธิบาย **การเปลี่ยนแปลงที่มีขนาดจำกัดซึ่งเกิดจาก**

กระบวนการทางกายภาพจริง (สสารและคลื่นความโน้มถ่วงที่ข้ามขอบฟ้า) ไม่ใช่ชั้นที่เล็กลงระหว่างสภาวะหยุดนิ่งสองสภาวะ ผู้เขียนจับคู่กฎนี้กับกฎข้อที่สองที่สอดคล้องกัน ซึ่งข้อความของกฎเป็น *เชิงปริมาณ* แล้ว กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ขอบฟ้าผูกโยงโดยตรงกับฟลักซ์พลังงานเฉพาะที่ — พื้นที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีฟลักซ์ไหลเข้าเป็นบวก หรือลดลงสำหรับขอบฟ้าแบบโทมัสโลกที่กำลังระเหยเมื่อฟลักซ์เป็นลบ เมื่อนำกฎข้อที่หนึ่งและสองมารวมกัน จึงได้ข้อสรุปที่ชัดเจนเพียงหนึ่งเดียวว่า สำหรับทุกช่วงที่แทนได้ด้วยช่วงขอบฟ้าพลวัต ไม่ว่าจะรุนแรงเพียงใด พื้นที่ขอบฟ้ายังคงเป็นมาตรวัดเอนโทรปีที่ถูกต้อง

สิ่งทงานนี้ *ไม่ได้* พิสูจน์

- งานนี้ **ไม่ได้** แก้ปัญหาแรงโน้มถ่วงควอนตัม กรอบหลักตั้งอยู่ในทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป ส่วนการนำไปใช้กับการระเหยของหลุมดำอาศัยการประมาณแบบกึ่งคลาสสิก ซึ่งให้สนามสสารควอนตัมกระทำต่อปริภูมิ-เวลาแบบคลาสสิก งานนี้ยังคงสมมติการระบุพื้นที่ขอบฟ้ากับเอนโทรปีตามมาตรฐาน แทนที่จะอนุมานเอนโทรปีนั้นจากสิ่งที่มันเป็นพื้นฐานยิ่งกว่า
- ไม่ได้** นับไม่โครสเตตหรืออธิบายว่าเอนโทรปีหลุมดำ *ประกอบจากอะไร* งานขยายการทำปัญหาอุณหพลศาสตร์หลุมดำ แต่ไม่ได้เปิดกล่องดองสาอัสระระดับจุลภาค
- ไม่ได้** แก้ปริศนาข้อมูลหลุมดำ ปัญหานี้ยังอยู่ในทฤษฎีควอนตัม; บทความนี้ไม่แตะมัน
- งานนี้ **ไม่ใช่** การสังเกตหรือการวัด ไม่มีกล้องโทรทรรศน์ ไม่มีข้อมูล และไม่มีสัญญาณคลื่นความโน้มถ่วงเข้ามาเกี่ยวข้อง — นี่คือการนิยาม “อุณหภูมิจากขอบฟ้า” ที่กำหนดให้ขอบฟ้าพลวัตขณะที่หลุมดำวิวัฒนาการเป็นปริมาณที่นิยามไว้อย่างแม่นยำในสมการ ไม่ใช่สิ่งที่อ่านค่าได้จากเทอร์โมมิเตอร์
- งานนี้ **ยังไม่ได้** ให้คำอธิบายทางอุณหพลศาสตร์ที่ต่อเนื่องครอบคลุมการรวมกันทั้งหมดของหลุมดำสองดวง การจำลองเชิงตัวเลขติดตามขอบฟ้าถึงเฉพาะที่ตลอดวิวัฒนาการทั้งหมด — จากหลุมดำต้นกำเนิด ผ่านการรวมตัว ไปจนถึงหลุมดำที่เหลือ — แต่ในช่วงเวลาสั้น ๆ ที่ใกล้การรวมตัวมาก ขอบฟ้านั้นจะไม่เป็นไปตามเงื่อนไขที่จำเป็นสำหรับช่วงขอบฟ้าพลวัต บทความนี้สรุปว่าคำอธิบายทางอุณหพลศาสตร์ของช่วงเวลานั้นยังอยู่ระหว่างการพัฒนา
- ไม่ได้** ล้มล้าง Bekenstein และ Hawking แต่ *ขยาย* ภาพของพวกเขาไปสู่ระบอบพลวัตที่กฎเดิมซึ่งใช้เฉพาะสมดุลไม่มีอะไรจะพูด

หลักฐานเชิงแรงแค่ไหน?

หนักแน่นสำหรับงานประเภทนี้ กล่าวคือ เป็นงานฟิสิกส์คณิตศาสตร์ที่ทำอย่างรอบคอบและสอดคล้องกันภายใน จากกลุ่มชั้นนำในสาขา และตีพิมพ์เป็น *Editors' Suggestion* ใน *Physical Review Letters* บทความนี้ผ่านการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิ ให้รายละเอียดการอนุมานที่ยาวกว่าและพิจารณากรณีต่าง ๆ ที่ตัดย่อยออกจาก Letter

ข้อจำกัดที่ตรงไปตรงมาเกี่ยวกับ *ชนิด* ของผลลัพธ์ ไม่ใช่คุณภาพ:

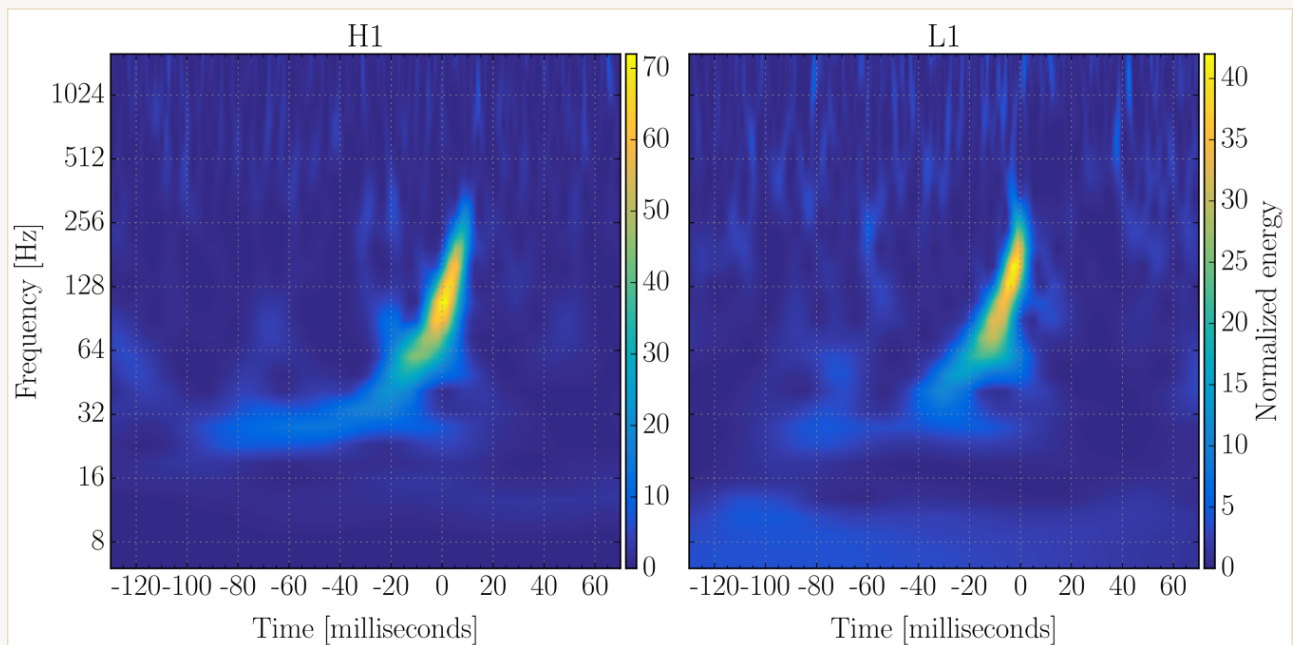
- มันตั้งอยู่บนสมมติฐานมาตรฐานว่าพื้นที่ขอบฟ้า คือ เอนโทรปี (พื้นที่หารด้วยสี่เท่าของค่าคงที่ของนิวตันและค่าคงที่พลังค์) ถ้าทฤษฎีแรงโน้มถ่วงควอนตัมเต็มรูปแบบในอนาคตแก้ไขการระบุนี้ การตีความก็ต้องขยับตาม
- เพื่อความกระชับและเรียบง่าย Letter ฉบับนี้เสนอการอนุมานหลักโดยใช้ขอบฟ้าพลวัตแบบสเปซไทม์ที่มีสมมาตรตามแกน บทความนี้ผ่านการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิวิเคราะห์ขอบฟ้าพลวัตแบบโทมัสโลกอย่างชัดเจน และสร้างนิยามโมเมนตัมเชิงมุมโดยไม่ต้องมีสนามคิลลิงของการหมุน อย่างไรก็ตาม สำหรับขอบฟ้าแบบโทมัสโลกที่กำลังระเหย การพิจารณาผลย้อนกลับอย่างชัดเจนจากคำจำกัดความที่สมมาตรทรงกลม
- “เอนโทรปีเท่ากับพื้นที่ขอบฟ้า แม้อยู่ไกลจากสมดุล” เป็น *การระบุ* ที่กฎข้อที่หนึ่งและสองใหม่ทำให้น่าเชื่อถือมาก ไม่ใช่ทฤษฎีบทที่พิสูจน์จากสถิติระดับจุลภาค

ดังนั้นนี่คือการขยายกรอบอายุหาสืบปอย่างเข้มงวด ไม่ใช่การค้นพบจากการทดลอง และไม่ใช้กฎธรรมชาติใหม่ที่รอการทดสอบ

ทำไมเรื่องนี้จึงสำคัญ

มีสองเหตุผล เหตุผลหนึ่งเชิงปฏิบัติ อีกเหตุผลเชิงแนวคิด

ในทางปฏิบัติ หลุมดำที่เราศึกษากันจริงในปัจจุบัน — หลุมดำที่ LIGO และ Virgo ได้ยินขณะรวมตัว — อยู่ห่างจากสมดุลง ในช่วงเวลาที่สำคัญที่สุด การจำลองติดตามขอบฟ้าถึงเฉพาะที่จากหลุมดำต้นกำเนิด ผ่านการรวมตัว ไปจนถึงหลุมดำที่เหลือ ปริมาณต่าง ๆ ในบทความนี้ใช้กับส่วนของขอบฟ้าที่นั่นซึ่งมีคุณสมบัติเป็นช่วงขอบฟ้าพลวัต จึงให้วิธีที่มีหลักการในการกล่าวถึง เอนโทรปีและอุณหภูมิของหลุมดำตลอดช่วงส่วนใหญ่ของวิวัฒนาการระหว่างการรวมตัวและระหว่างการยุบตัว ไม่ใช่เฉพาะหลังจากทุกอย่างสงบลงแล้ว ในเวลาสั้น ๆ รอบการรวมตัวพอดี ขอบฟ้าถึงเฉพาะที่ยังคงถูกติดตาม แต่ไม่อยู่ในคำอธิบายทาง อุณหพลศาสตร์ในปัจจุบัน



GW150914 สัญญาณคลื่นความโน้มถ่วงที่ตรวจพบโดยตรงเป็นครั้งแรก มาจากหลุมดำสองหลุมรวมตัวกัน แผนที่เวลา-ความถี่เหล่านี้ แสดงสัญญาณที่ LIGO Hanford (ซ้าย) และ LIGO Livingston (ขวา): ในทั้งสองเครื่อง เส้นสว่างกวาดขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มสูงเข้าใกล้การ รวมตัว นี่เป็นตัวอย่างจริงของระบบหลุมดำที่อยู่ไกลจากสมดุลง; ใช้เป็นบริบทสำหรับกรอบอุณหพลศาสตร์ใหม่ ไม่ใช่หลักฐานเชิงสังเกตของ กรอบนั้น

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

ในทางแนวคิด พฤติกรรมอุณหพลศาสตร์ของหลุมดำเป็นหนึ่งในเบาะแสที่เป็นรูปธรรมไม่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับแรงโน้มถ่วงควอนตัม — เป็นจุดที่แรงโน้มถ่วง ทฤษฎีควอนตัม และอุณหพลศาสตร์มาพบกันอย่างชัดเจน การทำให้คำว่า “เอนโทรปี” และ “อุณหภูมิ” มีความหมายแม่นยำขึ้นสำหรับหลุมดำที่กำลังเปลี่ยนอย่างรุนแรง ช่วยกำหนดเป้าหมายที่ทฤษฎีควอนตัมในอนาคตต้องอิงให้โดน งานไม่ได้ตอบคำถามลึกกว่าเอนโทรปีของหลุมดำจริง ๆ คืออะไร แต่มันตั้งคำถามให้แม่นยำขึ้น — ซึ่งในมุมมองของฟิสิกส์ นั่นคือส่วน ใหญ่ของงานแล้ว

สรุป

หลุมดำเป็นไปตามกฎที่คล้ายคลึงกับอุณหพลศาสตร์ แต่ “กฎข้อที่หนึ่ง” ฉบับกระชับชัดเจนในปี 1973 เปรียบเทียบเฉพาะหลุมดำที่หยุดนิ่งอยู่ในสมดุล และไม่สามารถอธิบายกระบวนการจริงได้ Ashtekar, Paraizo และ Shu ขยายทั้งกฎข้อที่หนึ่งและกฎข้อที่สองไปสู่หลุมดำที่อยู่ห่างจากสมดุลได้มากเพียงใดก็ได้ — หนึ่งรับสาร ยุบตัว สั่นไหวจนสงบลง และผ่านช่วงส่วนใหญ่ของการรวมตัว — โดยใช้ขอบฟ้าถึงเฉพาะที่ ใช้กฎอุณหพลศาสตร์กับช่วงขอบฟ้าพลวัตของมัน และสร้างการส่งที่กำหนดอุณหภูมิและเอนโทรปี ณ ขณะนั้นให้แต่ละสถานะตามช่วงเหล่านั้น ข้อสรุปคือพื้นที่ขอบฟ้ายังคงเป็นมาตรวัดเอนโทรปีที่ต้องสำหรับทุกช่วงที่แทนได้ด้วยช่วงขอบฟ้าพลวัต ช่วงเวลาสั้น ๆ ที่ใกล้การรวมตัวมากยังไม่ครอบคลุมด้วยคำอธิบายทางอุณหพลศาสตร์นั้น แม้ว่าการจำลองจะยังคงติดตามขอบฟ้าถึงเฉพาะที่ กรอบหลักอยู่ในทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป โดยมีการประยุกต์แบบกึ่งคลาสสิกกับการระเหย งานนี้ไม่ใช่แรงโน้มถ่วงควอนตัม ไม่ใช่การสังเกต ไม่ใช่การนับไมโครสเตต และไม่ใช่คำตอบของปริศนาข้อมูล

ประเมินแบบไม่เกินจริง

บทความแสดงอะไร: การขยายกฎข้อที่หนึ่งและสองของกลศาสตร์หลุมดำอย่างสอดคล้องทางคณิตศาสตร์ ไปยังหลุมดำพลวัตเต็มรูปแบบที่อยู่ไกลจากสมดุล โดยสร้างบนขอบฟ้าถึงเฉพาะที่และส่วนที่เป็นไปตามเงื่อนไขของช่วงขอบฟ้าพลวัต งานนี้ขยายกฎข้อที่หนึ่งแบบการเปลี่ยนแปลงขนาดจำกัดจากกระบวนการ และกฎข้อที่สองเชิงปริมาณ และทำให้การระบุเอนโทรปีของหลุมดำพลวัตกับพื้นที่ขอบฟ้าดูเป็นธรรมชาติ

อะไรที่เป็นของจริงแต่ยังเป็นการตีความ: การระบุว่า “เอนโทรปี = พื้นที่ขอบฟ้า” นอกสมดุล กฎใหม่ทำให้ข้อระบุที่น่าเชื่อถือ แต่ยังสืบทอดสมมติฐานพื้นที่-เอนโทรปีแบบคลาสสิกมาตรฐาน ไม่ได้อนุมานมันขึ้นใหม่

อะไรที่งานนี้ไม่ได้แสดง: ทฤษฎีแรงโน้มถ่วงควอนตัม; ต้นกำเนิดระดับจุลภาคหรือ “การนับ” เอนโทรปีหลุมดำ; คำตอบของ information paradox; ผลจากการสังเกตหรือการทดลองใด ๆ; หรืออุณหภูมิที่วัดทางกายภาพได้โดยตรง

ข้อจำกัดหลัก: การอนุมานหลักอยู่ในทฤษฎีสัมพัทธภาพทั่วไป ส่วนการประยุกต์กับการระเหยแบบใหม่โลกใช้การประมาณแบบกึ่งคลาสสิก; ช่วงเวลาสั้น ๆ ที่ใกล้การรวมตัวของระบบหลุมดำคู่มากไม่สามารถแทนด้วยช่วงขอบฟ้าพลวัตได้ และคำอธิบายทางอุณหพลศาสตร์ของช่วงนั้นยังอยู่ระหว่างการพัฒนา แม้ว่าการจำลองเชิงตัวเลขจะยังคงติดตามขอบฟ้าถึงเฉพาะที่; การพิจารณาผลย้อนกลับอย่างชัดเจนสำหรับขอบฟ้าแบบใหม่โลกที่กำลังระเหยจำกัดอยู่ที่สมมาตรทรงกลม; การระบุพื้นที่กับเอนโทรปีเป็นข้อสมมติ ไม่ได้พิสูจน์จากกลศาสตร์สถิติ

ผู้อ่านทั่วไปควรมั่นใจแค่ไหน? มั่นใจสูงว่านี่เป็นความก้าวหน้าทางทฤษฎีที่แข็งแกร่งและได้รับการยอมรับ ซึ่งขยายอุณหพลศาสตร์หลุมดำเข้าสู่ระบอบพลวัตจริง และมั่นใจสูงพอ ๆ กันว่ามัน *ไม่ใช่* ข้อกล่าวอ้างจากการสังเกตใหม่ ไม่ใช่แรงโน้มถ่วงควอนตัม และไม่ใช่การแก้ปริศนาข้อมูลอันโด่งดัง ทำที่ที่เหมาะสมคือ: ก้าวจริงในการทำความเข้าใจ ด้วยชอล์ก ไม่ใช่ด้วยกล้องโทรทรรศน์

การปรับปรุงหลังเผยแพร่

• การแก้ไข · 2026-08-27

หลังได้รับข้อเสนอแนะจาก Abhay Ashtekar ผู้เขียนสำหรับติดต่อ เราได้แก้ไขข้อความสองแห่งที่เคยระบุว่ากรณีแบบใหม่โลกและกรณีที่ไม่สมมาตรตามแกนเป็นเพียงสิ่งที่ผู้เขียนให้เหตุผลสนับสนุน ทั้งที่บทความคู่ซึ่งผ่านการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณากรณีเหล่านี้อย่างชัดเจนแล้ว ระหว่างการทบทวน เรายังชี้แจงด้วยว่ากรอบนี้ยังไม่ครอบคลุมช่วงเวลาสั้น ๆ ที่ใกล้การรวมตัวของระบบหลุมดำคู่มาก ซึ่งขอบฟ้าถึงเฉพาะที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของช่วงขอบฟ้าพลวัต

- **การแก้ไข · 2026-08-28**

หลังจากได้รับคำชี้แจงเพิ่มเติมจาก Abhay Ashtekar ผู้เขียนที่รับผิดชอบการติดต่อ เราได้แยกข้อบกพร่องที่เฉพาะที่ซึ่งการจำลองเชิงตัวเลขติดตามจากหลุมดำต้นกำเนิด ผ่านการรวมตัว ไปจนถึงหลุมดำที่เหลือ ออกจากส่วนที่เป็นไปตามเงื่อนไขเพิ่มเติมของช่วงขอบฟ้าพลวัตซึ่งเป็นบริเวณที่กฎอุณหพลศาสตร์ใช้ได้

แหล่งข้อมูล

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>