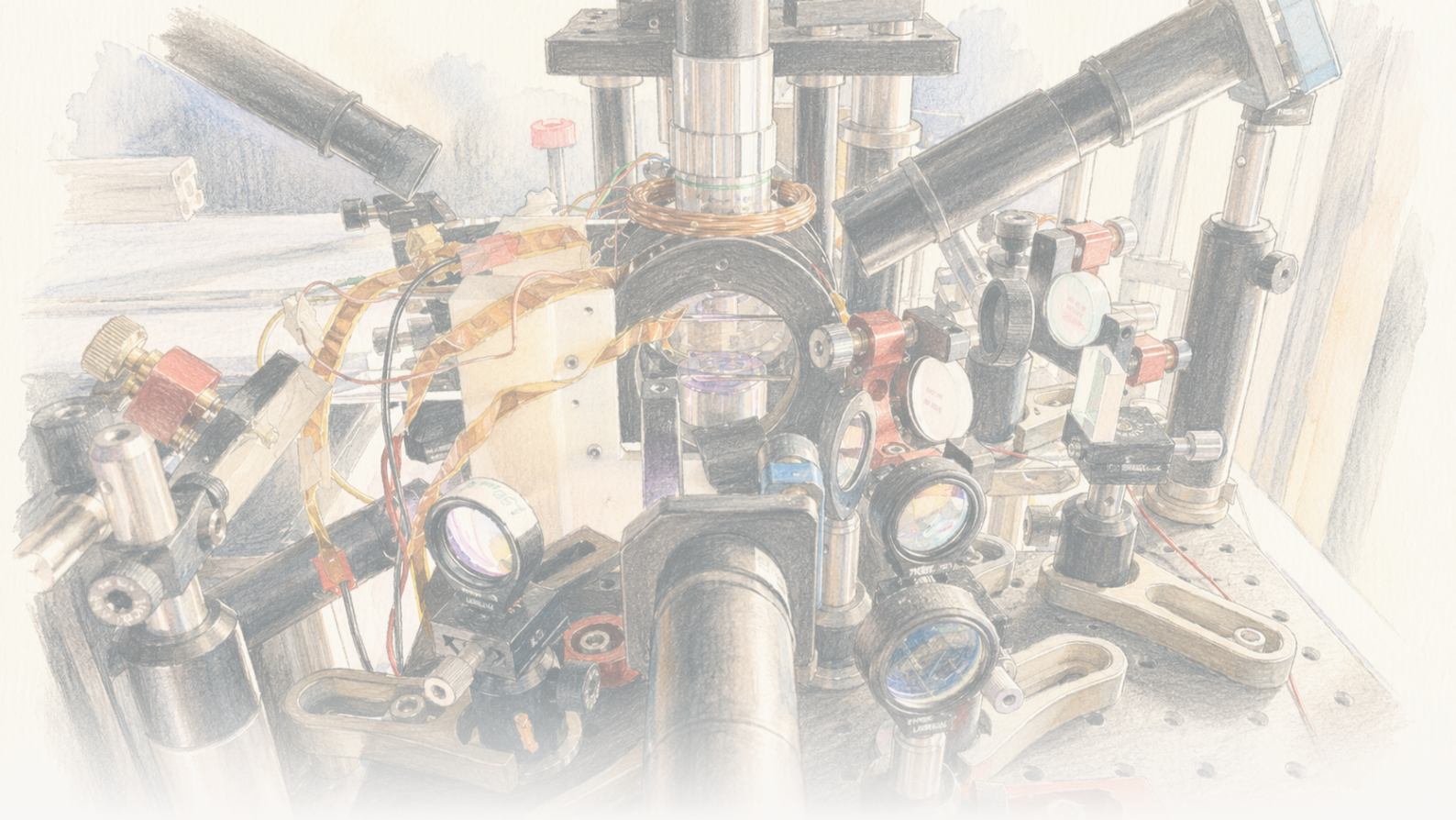

The Clean Paper

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

การทดลองอะตอมเย็นทดสอบ “ปัญหาเรื่องเวลา” ของแรงโน้มถ่วงควอนตัม — ในฐานะแบบจำลองในห้องปฏิบัติการ ไม่ใช่คำตอบ

ในแรงโน้มถ่วงควอนตัมแบบ canonical สมการ Wheeler-DeWitt ไม่มีนาฬิกาภายนอกสำหรับเรียงลำดับเหตุการณ์ ซึ่งเรียกว่า “ปัญหาเรื่องเวลา” การทดลองโดยผู้เขียนคนเดียวแยก Bose-Einstein condensate แบ่งด้วยกำแพงแสงบาง ๆ เป็นส่วนที่ไม่สังเกตกับส่วนที่สังเกต และสร้างนาฬิกาภายในจากเอนโทรปีที่ไหลระหว่างสองส่วน “entropic time” นั้นเรียงลำดับการขยายและยุบกลับของส่วนที่สังเกต และสมการเชิงผลหนึ่งให้ข้อมูลที่วัดได้กลับมาในกรณีกำแพงต่ำที่ตรวจศึกษา นี่คือ testbed แบบควบคุมสำหรับแนวคิด relational time: “big bang”, “big crunch” และ “miniuniverse” เป็นป้ายเปรียบเทียบสำหรับก๊าซที่ถูกกัก ไม่ใช่จักรวาลวิทยาจริง และงานไม่ได้อ้างว่าแก้ปัญหาเรื่องเวลาหรือแรงโน้มถ่วงควอนตัมแล้ว

Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Testing the problem of time with cold atoms*, Giovanni Barontini, Physical Review Research 8, L022047 (2026) · DOI: 10.1103/1h9j-df4k

นาฬิกาที่สร้างจากเอนโทรปี ภายในกับดักอะตอม

ในแรงโน้มถ่วงควอนตัมแบบ canonical มีปริศนาที่ทั้งแปลกและดื้อรั้น: สมการหลักไม่มีเวลาอยู่ในนั้นเลย สมการ Wheeler-DeWitt ซึ่งใกล้เคียงที่สุดกับ สมการ Schrodinger สำหรับจักรวาลทั้งจักรวาล บอกเพียงว่าโอเปอเรเตอร์บางตัวกระทำต่อสถานะแล้วได้ศูนย์ ไม่มีพารามิเตอร์ภายนอกที่เดินติ๊ก ๆ ไม่มีอะไรจัดลำดับ “ก่อน” กับ “หลัง” — แต่ประสบการณ์ของเรากลับชัดเจนว่าเวลาผ่านไป นี่คือ **problem of time** และยังไม่มีคำตอบที่ยุติความขัดแย้งได้มานานกว่าครึ่งศตวรรษ

บทความผู้เขียนคนเดียวใน *Physical Review Research* ไม่ได้แก้ปริศนานี้ สิ่งที่มันทำเงียบกว่า และในแบบของมันมีประโยชน์กว่า: สร้างระบบห้องปฏิบัติการขนาดเล็กที่ควบคุมได้ดี ซึ่งทำให้คำตอบที่ถูกเสนอไว้ตระกูลหนึ่งสามารถ **ทดสอบกับข้อมูลจริง** ได้ Giovanni Barontini จาก University of Birmingham ใช้ Bose-Einstein condensate — กลุ่มอะตอมเย็นจัดที่ประพฤติตัวเหมือนวัตถุควอนตัมชิ้นเดียว — ทำเป็นระบบอะนาล็อกที่แนวคิดเรื่องเวลา “ภายใน” หรือเวลาเชิงสัมพันธ์สามารถวัดได้แทนที่จะเถียงกันอย่างเดียว เคล็ดลับคือสร้างนาฬิกาไม่จากนาฬิกาจับเวลาภายนอก แต่จากเอนโทรปีที่ระบบย้ายไปมาภายในตัวเอง

ระยะห่างระหว่าง “อะนาล็อกที่ควบคุมได้ของ problem of time” กับ “นักฟิสิกส์แก้ปัญหาเรื่องเวลาแล้ว” คือใจกลางของเรื่องนี้ และมันห่างกันมาก

นักวิจัยทำอะไร

อุปกรณ์คือคอนเดนเสตของอะตอม rubidium-87 ราว **24,000 อะตอม** ถูกกักใน conservative optical dipole trap และทำให้สั่น — กลุ่มอะตอมทั้งก้อนแกว่งไปมาในกับดัก มี **กำแพงแสงบาง** กว้างประมาณ 8 ไมครอน สร้างด้วยแสง 675 nm ผ่าน digital micromirror device แบ่งกับดักเป็นสองครึ่ง ครึ่งหนึ่งถูกสังเกต (“**bright sector**”); อีกครึ่งไม่ถูกสังเกต (“**dark sector**”) ในช่วงทดลองราว 100 มิลลิวินาที ระบบไม่แสดงการสูญเสียอนุภาคหรือการสลายพลังงานที่วัดได้ ดังนั้นโดยประมาณที่ดีมันเป็นระบบปิดที่ Hamiltonian ของมันเองไม่ได้ขึ้นกับเวลา

[figure_pair pending]

ซ้าย: magneto-optical trap สร้างกลุ่มอะตอมรูบิเดียมเย็นภายในเซลล์แก้ว ซึ่งเป็นขั้นตอนการทำให้เย็นระยะแรกระหว่างการเตรียม condensate ขวา: Giovanni Barontini ยืนข้างชุดอุปกรณ์ออปติก ภาพเหล่านี้เป็นภาพถ่ายระบบห้องปฏิบัติการเบื้องหลังการทดลอง ไม่ใช่ภาพของจักรวาลจึ๋งจริง ๆ

เมื่อมองด้วยนาฬิกาห้องปฏิบัติการทั่วไป — ถ่ายภาพ absorption ทุก 2 ms — bright sector ทำบางอย่างที่ชวนให้นึกถึงจักรวาล อะตอมไหลข้ามกำแพงและภาคนี้เติบโตขึ้นจากศูนย์ (Barontini เรียกช่วงนี้ว่า “**big bang**”) ขยายถึงขนาดสูงสุด จากนั้นหดตัวและไหลกลับไปฝั่งมืดจนว่างลง (เรียกว่า “**big crunch**”) หากเปลี่ยนความสูงของกำแพง วงจรนี้อาจเกิดซ้ำได้

จากนั้นจึงมาถึงประเด็นจริง นาฬิกาห้องปฏิบัติการอยู่ *ภายนอก* ระบบ — เป็นสิ่งแบบเดียวกับที่บริบท Wheeler-DeWitt ไม่อนุญาต ดังนั้น Barontini ถามว่า: ประวัติของ bright sector สามารถ **เรียงลำดับโดยใช้เฉพาะปริมาณภายในระบบ** ได้หรือไม่? คำตอบคือเขาสร้างนาฬิกาที่เรียกว่า **entropic time** ซึ่งอ่านจากภาพชุดเดิมโดยตรงในสามขั้นง่าย ๆ ขั้นแรก จาก absorption image แต่ละภาพ เขาดึงค่าของ bright sector สี่ค่า: จำนวนอะตอม, จุดศูนย์กลางมวลของโปรไฟล์ความหนาแน่น (ทำหน้าที่เป็น “scalar field” แบบอะนาล็อก), ความกว้าง และเอนโทรปี — เอนโทรปีต่ออะตอมที่คำนวณด้วยวิธีมาตรฐานคูณด้วยจำนวนอะตอม ขั้นที่สอง เมื่ออะตอมข้ามกำแพง เอนโทรปีดังกล่าวเพิ่มและลด ขั้นที่สาม นาฬิกาตาม gradient ของเอนโทรปีไปตามเส้นทางศูนย์กลางมวลที่วัดได้ โดยนับขนาดของการกระจัดแต่ละก้าวแทนทิศทาง เมื่อเอนโทรปีและศูนย์กลางมวลเพิ่มหรือลดไปด้วยกัน แต่ละก้าวยังทำให้นาฬิกาเดินหน้าแม้เมฆอะตอมจะกลับทิศ ในข้อมูล วิธีนี้ให้การเรียงลำดับเดียว

ตั้งแต่ “big bang” ถึง “big crunch” แทบทุกจุด มีเพียงการแกว่งเล็กน้อยไม่กี่ตำแหน่งที่การสุ่มตัวอย่างค่อนข้างหยาบทำให้การเปลี่ยนแปลงสองปริมาณไม่ตรงกัน

สุดท้าย เขาอนุมาน **“สมการ Schrodinger ในเวลาเอนโทรปี”** แบบมีประสิทธิผล — สมการวิวัฒน์ของ bright sector ที่เขียนด้วยนาฬิกาภายในนี้แทนเวลาภายนอก — และแก้เชิงตัวเลขเพื่อดูว่ามันสร้างสิ่งที่กล้องบันทึกจริงได้หรือไม่

พบอะไร

มีผลสามอย่าง เรียงจากข้อกล่าวอ้างเล็กไปใหญ่ขึ้น

- **นาฬิกาภายในใช้เรียงลำดับได้** Entropic time เพิ่มขึ้นแบบโมโนโทนิกแทบทุกจุด และความเร็วของมันกำหนดโดยอัตราที่เอนโทรปีข้ามกำแพง: มันเดินเร็วเมื่อมีการแลกเปลี่ยนเอนโทรปี และ **หยุดสนิทเมื่อไม่มีการแลกเปลี่ยน** ในระบอบกำแพงต่ำที่ย้อนกลับได้ *ไม่มีเวลาภายในผ่านเลย* ระหว่าง big crunch หนึ่งครั้งกับ big bang ถัดไป — เพราะช่วงนั้นไม่มีการแลกเปลี่ยนเอนโทรปี — แม้นาฬิกาห้องปฏิบัติการจะยังเดินต่อ ในข้อมูลทั้งหมด เอนโทรปีรวมของสองภาครวมกันคงที่ภายใน แถบค่าคลาดเคลื่อน ตามที่ระบบปิดควรเป็น
- **ระบอบต่างกันให้ “เวลา” ต่างกัน** ยกกำแพงให้สูงขึ้น การแลกเปลี่ยนเอนโทรปีลดลง นาฬิกาภายในจึงเดินช้าลง ดันไปถึงจุดที่สองภาคแทบไม่สื่อสารกัน bright sector จะค่อย ๆ เข้าสู่สิ่งที่บทความเรียกว่า “**heat death**”: สภาวะนิ่งที่ entropic time หยุดเดิน
- **สมการแบบมีประสิทธิผลสร้างข้อมูลซ้ำได้** สมการ Schrodinger ใน entropic time เมื่อใส่พารามิเตอร์จากการทดลองสามารถสร้างวิวัฒน์ที่วัดได้ของความกว้างเมฆอะตอมเชิงตัวเลขได้ โดยบทความรายงานความสอดคล้องยอดเยี่ยมในกรณีกำแพงต่ำ (ซึ่งพจน์ที่ขับด้วยเอนโทรปีเด่น); การเปรียบเทียบเชิงตัวเลขอย่างชัดเจนทำกับกรณีนั้น

> **“problem of time” คืออะไร และ “entropic time” ในที่นี้คืออะไร**
>
> **Problem of time** คือสมการหลักของแรงโน้มถ่วงควอนตัมแบบ canonical (Wheeler-DeWitt) ไม่มีตัวแปรเวลาภายนอก คำตอบแบบหนึ่งที่พบบ่อยคือแนวคิด *relational*: ยกปริมาณทางกายภาพบางอย่างในระบบขึ้นเป็น “นาฬิกา” แล้วอธิบายสิ่งอื่นทั้งหมดเทียบกับมัน ปัญหาที่เกิดซ้ำคือปริมาณที่ดูเหมาะจะเป็นนาฬิกาไม่ได้เป็นโมโนโทนิกเสมอ — ระบบที่ขยายแล้วหดกลับทำให้นาฬิกาผู้สมัครเดินไปข้างหน้าแล้วถอยกลับ จึงไม่สามารถระบุทิศทางเดียวจากต้นจนจบอย่างสะอาด
> **Entropic time** คือวิธีของ Barontini ที่หลบปัญหานี้ แทนที่จะอ่านตัวแปรคล้ายตำแหน่ง เขาสร้างนาฬิกาจาก *เอนโทรปี* ที่แลกเปลี่ยนระหว่างภาคที่สังเกตกับภาคที่ไม่สังเกต โดยออกแบบให้มันไม่ย้อนกลับ แนวคิดนี้มีเครือญาติทางความคิดกับ “thermal time” รุ่นเก่า แต่ที่นี่นิยามเชิงปฏิบัติจากการไหลของเอนโทรปีที่วัดได้ ไม่ใช่จากโครงสร้างคณิตศาสตร์เชิงนามธรรม — ซึ่งนี่เองทำให้มันทดสอบได้บนอุปกรณ์จริง
> ที่สำคัญ คำศัพท์จักรวาลวิทยา — “big bang”, “big crunch”, “scale factor”, “scalar field”, “miniuniverse” — เป็น **ป้ายกำกับแบบอะนาล็อก** พวกมันตั้งชื่อคุณสมบัติของก๊าซอะตอมในกับดักที่บังเอิญ *มีโครงสร้างทางคณิตศาสตร์คล้าย* สมการของแบบจำลองจักรวาลวิทยาแบบง่าย ไม่ใช่คำกล่าวเกี่ยวกับจักรวาลจริง

สิ่งที่งานนี้ไม่ได้พิสูจน์

ตรงนี้ต้องระวังที่สุด เพราะคำศัพท์ชวนให้ตีความเกินง่าย

- **ไม่ได้แก้ problem of time และบทความก็ไม่ได้อ้างว่าแก้แล้ว** กรอบของงานเองบอกว่า “สร้างสภาพแวดล้อมทดลองที่ควบคุมได้ ซึ่งโครงสร้างเวลาเชิงสัมพันธ์สามารถถูกทดสอบเชิงปริมาณ” Testbed ไม่ใช่ทฤษฎีบท คำถามว่า relational time หรือ entropic time เป็นคำอธิบาย *ที่ถูกต้อง* ของเวลาในแรงโน้มถ่วงควอนตัมหรือไม่ยังเปิดอยู่เหมือนเดิม
- **นี่เป็นอะนาล็อก ไม่ใช่จักรวาล** ไม่มีการสังเกตจักรวาลวิทยา สิ่งที่สังเกตคือ Bose-Einstein condensate ในกับดัก และคำอธิบายแบบลดรูปของมัน *คล้ายทางคณิตศาสตร์* กับแบบจำลองจักรวาลวิทยาแบบง่าย (“minisuperspace”) ความคล้ายคือจุดสำคัญของการทดลอง; และก็เป็นขอบเขตของมันด้วย ไม่มีอะไรในงานนี้แสดงว่าจักรวาลยุคต้นมี big bang แบบนี้ ปริภูมิ-เวลาสร้างจากอะตอม หรือ “เวลาไม่มีอยู่จริง”
- **ไม่ได้แสดงว่าเวลา ‘จริง ๆ แล้ว’ คือเอนโทรปี** นาฬิกาเอนโทรปีเป็นการจัดลำดับที่สร้างขึ้นหนึ่งแบบและทำงานได้ดีในระบบนี้ บทความชี้ถึงความใกล้ชิดเชิงแนวคิดกับ thermal-time hypothesis แต่เปิดไว้ชัดเจนว่าทั้งสองอาจไม่ตรงกันด้วยซ้ำ “นาฬิกาภายในที่สร้างจากเอนโทรปีเรียงลำดับการทดลองนี้ได้” เป็นข้อกล่าวอ้างแคบกว่ามากเมื่อเทียบกับ “เวลาคือเอนโทรปี”
- **สมการแบบมีประสิทธิผลเป็นผลจากการสร้างแบบจำลอง ไม่ใช่การเขียนกลศาสตร์ควอนตัมใหม่** สมการ Schrodinger ใน entropic time ที่อนุมานได้ลดรูปเป็นกลศาสตร์ควอนตัมปกติเมื่อการไหลของเอนโทรปีช้า และจะเป็นทฤษฎียูนิตารีตามปกติอย่างเคร่งครัดก็ต่อเมื่อไม่มีเอนโทรปีไหลเลย บทความวางมันเป็นสมการที่ทั่วไปกว่ามาตรฐาน *เฉพาะเมื่อระบบที่สังเกตเปิดทางอุณหพลศาสตร์ต่อระบบที่ไม่สังเกต* — เป็นข้อความเกี่ยวกับระบบย่อยเปิดในชุดทดลองแบบนี้ ไม่ใช่ข้ออ้างว่าฟิสิกส์พื้นฐานต้องเขียนใหม่ด้วยวิธีนี้
- **นี่คือการทดลองหนึ่งงาน ผู้เขียนหนึ่งคน และนาฬิกาที่เลือกหนึ่งแบบ** ผลมีความไม่แน่นอนเชิงสถิติประมาณ 5% ต่อจุด และพึ่งการประมาณแบบ mean-field กับความหนาแน่นเฉลี่ย การเลือกนาฬิกาและ coarse-graining เป็นการตัดสินใจในการสร้างแบบจำลองโดยตั้งใจ ซึ่งกลุ่มอื่นควรตรวจสอบก่อนจะสรุปเชิงโครงสร้าง

หลักฐานแข็งแรงแค่ไหน

สำหรับข้อกล่าวอ้างระดับพอประมาณที่งานทำจริง หลักฐานถือว่าสะอาด ระบบถูกแยกจากภายนอกได้ดีจริงในสเกลเวลาที่เกี่ยวข้อง บัญชีเอนโทรปีปิดได้ (เอนโทรปีรวมคงที่ภายใน error) นาฬิกาภายในเรียงลำดับข้อมูลแบบโมโนโทนิกได้เกือบทุกจุด และสมการแบบมีประสิทธิผลที่ผู้เขียนอนุมานจากแบบจำลองเดียวกัน พร้อมพารามิเตอร์ที่ได้จากข้อมูล สามารถสร้างพลวัตที่วัดได้ในกรณีกำแพงต่ำที่นำไปใช้ ข้อมูลเปิดให้เข้าถึง นี่คือการวัดจริงของระบบจริงที่ควบคุมได้ ไม่ใช่ thought experiment

สิ่งที่หลักฐานรองรับได้ก็มีขนาดพอ ๆ กัน ทุกอย่างตั้งอยู่บนความคล้ายระหว่างแบบจำลอง condensate แบบลดรูปกับจักรวาลวิทยา minisuperspace และอะนาล็อกช่วยให้เห็นภาพโดยไม่พิสูจน์ การที่แพลตฟอร์มเดียว จากผู้เขียนคนเดียว แสดงว่าสูตรเวลาภายในหนึ่งแบบใช้งานได้ เป็น proof of principle ที่แข็งแรง แต่เป็นฐานที่อ่อนสำหรับข้อกล่าวอ้างว่าเวลาในธรรมชาติประพฤติอย่างไร การอ่านที่เหมาะสมคือ: ตอนนี้วิธีนี้เป็นสิ่งที่คุณ *ทำ* ในห้องปฏิบัติการและตรวจสอบได้แล้ว

ทำไมเรื่องนี้จึงสำคัญ

การถกเถียงเรื่อง problem of time ติดอยู่ในระดับ formalism มานาน ซึ่งข้อเสนอคู่แข่งทดสอบให้ล้มได้ยากเพราะให้คำทำนายเชิงวัดได้น้อย การเปลี่ยนแม้เพียงมุมหนึ่งของการถกเถียงให้เป็นการทดลองที่รันได้ — ที่นาฬิกาภายในจะเรียงข้อมูลได้หรือไม่ได้ สมการแบบมีประสิทธิผลจะฟิตหรือไม่ฟิต — เปลี่ยนธรรมชาติของข้อถกเถียง มันให้ “โต๊ะทดลอง” แก่นักทฤษฎีไว้ลองเครื่องมือของตน

นี่คือผลงานจริง: ไม่ใช่คำตอบเรื่องเวลา แต่เป็น **สถานที่ที่ทำให้ถามคำถามนั้นเชิงปริมาณได้** แพลตฟอร์มอะตอมเย็นถูกใช้

เป็นอะนาล็อกที่ควบคุมได้สำหรับรังสี Hawking จักรวาลขยาย และการสลายตัวของ false vacuum อยู่แล้ว งานนี้เพิ่ม relational time กับลูกศรของเวลาเข้ากล่องเครื่องมือ คุณค่าอยู่ในงานต่อยอดที่มันเปิดทาง — เลือกนาฬิกาแบบอื่น, เปรียบเทียบพฤติกรรม bounce กับ singularity, ทดสอบการย้อนกลับได้ — แต่ละอย่างกลายเป็นการวัด ไม่ใช่แค่การคำนวณ

สรุป

นักฟิสิกส์สร้าง Bose-Einstein condensate แบ่งมันด้วยกำแพงแสงบางเป็นครึ่งที่สังเกตและไม่สังเกต แล้วใช้เอนโทรปีที่ไหลระหว่างสองครึ่งสร้าง “entropic time” ภายใน นาฬิกานี้เรียงลำดับวงจรการขยายและหดกลับของครึ่งที่สังเกต เดินเร็วเมื่อมีการแลกเปลี่ยนเอนโทรปีและหยุดเมื่อไม่มี และสมการแบบมีประสิทธิผลที่เขียนด้วยเวลาภายในนี้สามารถสร้างข้อมูลที่วัดได้ในกรณีกำแพงต้านที่ผู้เขียนตรวจ ระบบนี้เป็นอะนาล็อกของ “problem of time” ในแรงโน้มถ่วงควอนตัมแบบ canonical: “big bang”, “big crunch” และ “miniuniverse” เป็นป้ายสำหรับก๊าซในกับดักที่มีคณิตศาสตร์คล้ายแบบจำลองจักรวาลวิทยาอย่างง่าย นี่คือ testbed ที่ควบคุมได้สำหรับแนวคิด relational time — ไม่ใช่คำตอบของ problem of time ไม่ใช่ข้อกล่าวอ้างเกี่ยวกับจักรวาลจริง และไม่ใช่หลักฐานว่าเวลา “จริง ๆ แล้ว” คือเอนโทรปี

ประเมินแบบไม่เกินจริง

บทความแสดงอะไร: ในระบบอะตอมเย็นที่แยกตัวดีหนึ่งระบบ นาฬิกาภายในที่นิยามจากการแลกเปลี่ยนเอนโทรปีสามารถเรียงลำดับพลวัตที่สังเกตแบบโมโนโทนิกได้ และสมการ “entropic-time” แบบมีประสิทธิผลสร้างวิวัฒน์ที่วัดได้ในกรณีกำแพงต้านที่ตรวจ

อะไรที่เป็นไปได้แต่ยังไม่แสดง: entropic time หรือ relational time อาจเป็นคำอธิบายที่ดีของเวลาในแรงโน้มถ่วงควอนตัมจริง การทดลองทำให้แนวคิดนี้สมควรถูกพิจารณาจริงจัง แต่ไม่ได้ยืนยันว่าธรรมชาติใช้มัน

อะไรที่งานนี้ไม่ได้แสดง: ว่า problem of time ถูกแก้แล้ว; แรงโน้มถ่วงควอนตัมถูกแก้แล้ว; จักรวาลเริ่มด้วย big bang แบบนี้; ปริภูมิ-เวลาเกิดจากอะตอม; หรือ “เวลาไม่มีอยู่จริง”

ข้อจำกัดหลัก: แพลตฟอร์มเดียว ผู้เขียนคนเดียว นาฬิกาที่เลือกหนึ่งแบบ; ความไม่แน่นอนประมาณ 5% ต่อจุด; การประมาณ mean-field และ averaged density; และเหนือทั้งหมดคือการพึ่งความคล้ายระหว่าง condensate ในกับดักกับแบบจำลองจักรวาลวิทยาอย่างง่าย

ผู้อ่านทั่วไปควรมั่นใจแค่ไหน? มั่นใจสูงว่าการทดลองทำสิ่งที่รายงานได้จริงในระบบของมันเอง มั่นใจต่ำสำหรับการกระโดดจากอะนาล็อกนี้ไปสู่ข้อกล่าวอ้างเกี่ยวกับเวลาในจักรวาลจริง

แหล่งข้อมูล

Barontini, Testing the problem of time with cold atoms, Physical Review Research 8, L022047 (2026)
https://doi.org/10.1103/1h9j-df4k