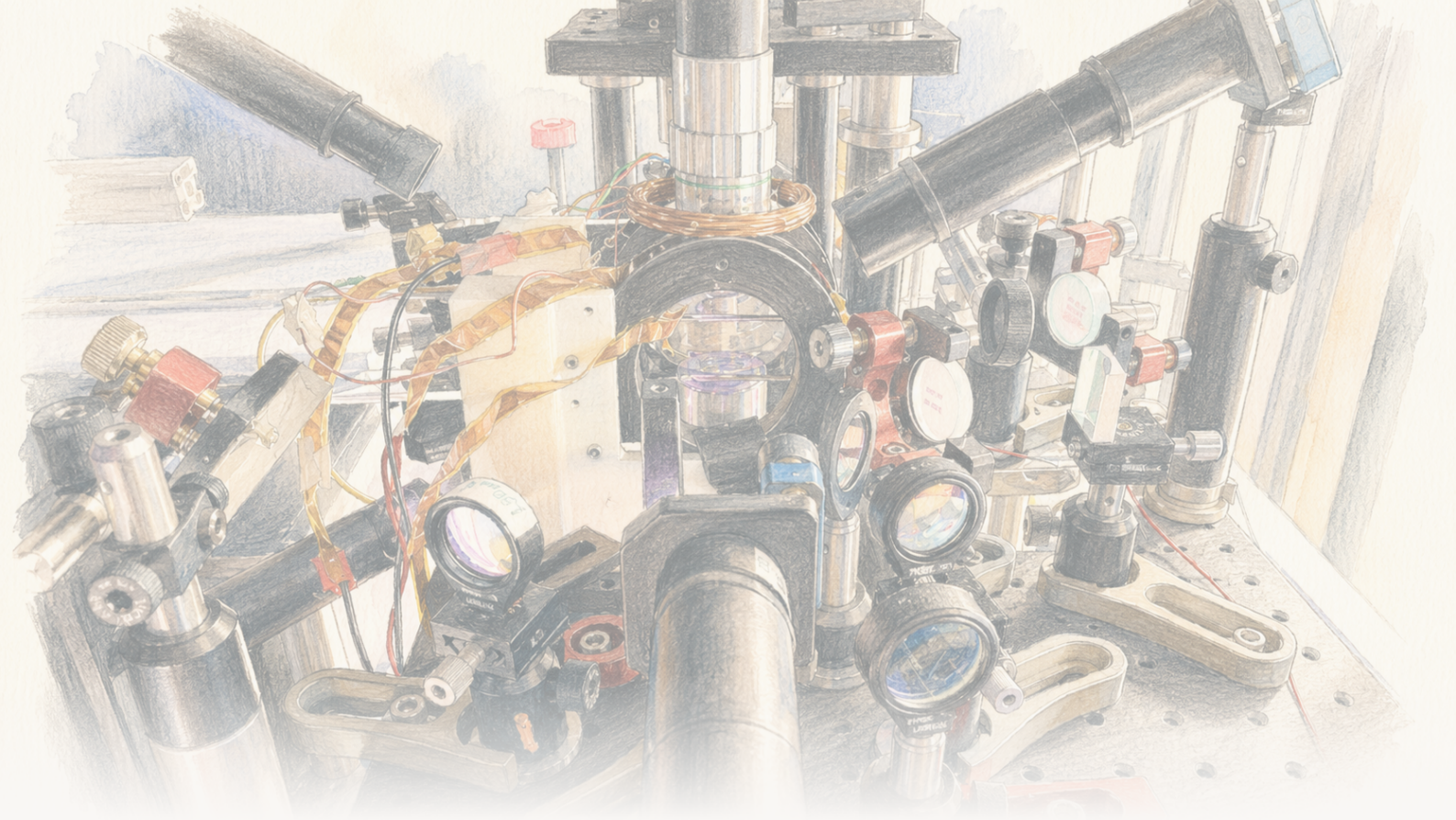

The Clean Paper

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

Cold-atom experiment quantum gravity के 'problem of time' कोtest करताहै — laboratory analog के रूप में, उत्तर के रूप में नहीं

canonical quantum gravity में Wheeler-DeWitt equation में घटनाओं काक्रम तय करने वालीexternal clock नहीहोती— यही'problem of time' है। एक single-author experiment Bose-Einstein condensate कोisolate कर thin optical barrier से observed और unobserved sectors में बंटताहै और उनके बीच entropy flow से internal clock बनताहै। यह 'entropic time' observed sector के expansion और recollapse कोorder करतीहै, और low-barrier case में effective equation measured data reproduce करतीहै। यह relational-time ideas काcontrolled testbed है: 'big bang', 'big crunch' और 'miniuniverse' trapped gas के analog labels हैं, real cosmology नहीं; कम problem of time याquantum gravity solve करने काclaim नहींकरता।

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

एक ट्रैप के भीतर एंट्रॉपी से बनी घड़ी

क्वांटम गुरुत्वाकर्षण में एक अजीब और लंबे समय से चली आ रही पहेली है: उसकी केंद्रीय समीकरण में समय ही नहीं है। Wheeler-DeWitt समीकरण, जिसे पूरे ब्रह्मांड के लिए Schrödinger समीकरण का सबसे करीबी समकक्ष कहा जा सकता है, बस यह कहता है कि अवस्था पर एक निश्चित ऑपरेटर लगाने का परिणाम शून्य है। कोई बाहरी पैरामीटर टिक-टिक नहीं करता, “पहले” और “बाद में” का क्रम तय करने वाली कोई चीज़ नहीं है — फिर भी हम समय को गुजरते हुए अनुभव करते हैं। यही **समय की समस्या (problem of time)** है, और आधी सदी से अधिक समय से इसका समाधान नहीं मिला है।

भौतिकी समीक्षा Research में प्रकाशित एक-लेखक शोधपत्र इसे हल नहीं करता। वह कुछ अधिक सीमित, लेकिन अपने तरीके से उपयोगी काम करता है: एक छोटा और अच्छी तरह नियंत्रित प्रयोगशाला तंत्र बनता है जिसमें प्रस्तावित उत्तरों के एक परिवार को **वास्तविक डेटा के सामने परखा** जा सके। विश्वविद्यालय of Birmingham के Giovanni Barontini एक Bose-Einstein condensate — अत्यंत ठंडे परमाणुओं का बादल जो एक समूह कि क्वांटम वस्तु की तरह व्यवहार करता है — को ऐसे अनुरूप तंत्र में बदलते हैं जिसमें “आंतरिक” या संबंधपरक समय के विचार को केवल बहस का विषय रखने के बजाय मापा जा सके। तरकीब यह है कि घड़ी बाहर की स्टॉपवॉच से नहीं, बल्कि तंत्र के भीतर इधर-उधर होने वाले एंट्रॉपी विनिमय से बनाई जाए।

“समय की समस्या का नियंत्रित अनुरूप मॉडल” और “भौतिकविदों ने समय की समस्या हल कर दी” के बीच की दूरी ही इस कहानी का सबसे महत्वपूर्ण हिस्सा है — और यह दूरी बहुत बड़ी है।

शोधकर्ताने क्या किया

उपकरण में लगभग **24,000 रुबिडियम-87 परमाणुओं** का कंडेन्सेट है, जिसे संरक्षी ऑप्टिकल डिपोल ट्रैप में रखकर दोलन कराया गया— पूरा परमाणु-बादल ट्रैप में आगे-पीछे झूलता है। एक **पतली ऑप्टिकल बाधा** — लगभग 8 माइक्रोन चौड़ी डिजिटल माइक्रोमिरर डिवाइस से 675 nm प्रकाश के जरिए बनाई गई — ट्रैप को दो हिस्सों में बाँटती है। एक आधा देखा जाता है (“**उज्ज्वल क्षेत्र**”), दूसरा नहीं (“**अदृश्य क्षेत्र**”)। प्रयोग की लगभग 100-मिलीसेकंड अवधि में मापने योग्य कण-हानि या अपव्यय नहीं दिखा, इसलिए अच्छे सन्निकटन में तंत्र बंद है और उसका हैमिल्टोनियन स्वयं समय पर निर्भर नहीं करता।

[figure_pair pending]

बाईं ओर मैग्नेटो-ऑप्टिकल ट्रैप काँच की कोशिका के भीतर रुबिडियम परमाणुओं का ठंडा बादल बनता है — कंडेन्सेट तैयार करने का शुरुआती शीतलन चरण। दाईं ओर Giovanni Barontini ऑप्टिकल उपकरण के पास खड़े हैं। ये प्रयोगशाला तंत्र की तस्वीरें हैं, किसी वास्तविक लघु ब्रह्मांड की नहीं।

सामान्य प्रयोगशाला घड़ी से देखें — हर 2 ms पर अवशोषण-चित्र — तो उज्ज्वल क्षेत्र कुछ ऐसा करता है जिसकी भाषा ब्रह्मांड-विज्ञान की याद दिलाती है। परमाणु बाधा पार करते हैं और यह क्षेत्र लगभग शून्य से बढ़ता है (Barontini इस क्षण को “**बड़ा Bang**” कहते हैं), अधिकतम विस्तार तक जाता है, फिर सिकुड़ता है और अदृश्य हिस्से में खाली हो जाता है (“**बड़ा Crunch**”)। बाधा की ऊँचाई के अनुसार यह चक्र बार-बार हो सकता है।

फिर असली सवाल आता है। प्रयोगशाला घड़ी तंत्र के *बाहर* है — ठीक वही चीज़ जो Wheeler-DeWitt व्यवस्था में उपलब्ध नहीं होती। इसलिए Barontini पूछते हैं: क्या उज्ज्वल क्षेत्र के इतिहास को **केवल तंत्र के भीतर की राशियों से क्रम दिया जा सकता है**? उनका उत्तर एक घड़ी है जिसे वे **एंट्रॉपिक समय (entropic time)** कहते हैं। इसे उन्हीं चित्रों से तीन साधारण चरणों में पढ़ा जाता है। पहले हर अवशोषण-चित्र से उज्ज्वल क्षेत्र की चार राशियाँ निकाली जाती हैं: परमाणुओं की संख्या, घनत्व-प्रोफ़ाइल का दूसरा क्षण-केंद्र (जो अनुरूप मॉडल में “स्केलर फ़ील्ड” की भूमिका निभाता है), उसकी चौड़ाई और एंट्रॉपी

— समक वधि से मलिीप्रति-परमाणु एंट्रॉपीकोपरमाणु संख्यासे गुणाकरके। दूसरा परमाणु बाधापार करते हैं तोएंट्रॉपीबढ़ती और घटतीहै। तीसरा घड़ीमापे गए द्रव्यमान-केंद्र के मार्ग के साथ एंट्रॉपीढाल काअनुसरण करतीहै और हर वस्थिापन की दशिानही उसकापरमिाण गनितीहै। जब एंट्रॉपीऔर द्रव्यमान-केंद्र साथ में बढ़ें याघटें, तोबदल दशिाबदलने पर भीहर कदम घड़ीकोआगे बढ़ताहै। डेटामें इससे क्षेत्र के "बड़ाBang" से "बड़ाCrunch" तक लगभग हर जगह एक हीदशिावाला क्रम मलिताहै; केवल कुछ छोटे उतार-चढ़ाव हैं, जहाँमोटे समय-नमूनाकरण के कारण दोनोंबदलाव असहमत दखिते हैं।

अंत में वे एक प्रभावी **"एंट्रॉपिक-समय Schrödinger समीकरण"** नकिालते हैं — उज्ज्वल क्षेत्र के वकिास कीऐसीसमीकरण जसिमें बहरीसमय कीजगह यह आंतरकि घड़ीइस्तेमाल होतीहै — और उसे संख्यात्मक रूप से हल करके देखते हैं कि क्या वह कैमरे से दर्ज वकिास कोदोहरासकतीहै।

क्यामलिा

महत्त्वाकांक्षाके बढ़ते क्रम में तीन नतीजे हैं:

- **आंतरकि घड़ीक्रम देने काकाम करतीहै।** एंट्रॉपिक समय लगभग हर जगह एक हीदशिामें बढ़ताहै और उसकीगतइस पर नरि्भर करतीहै कि बाधाके पार एंट्रॉपीकितनीतेजीसे अदलाबदलीहोरहीहै: वनिमिय तेज होतोघड़ीतेज चलती है और **जब एंट्रॉपीकाकोई वनिमिय नहीहोतातोपूरीतरह रुक जतीहै**। प्रतविर्ती कम-बाधावालीअवस्थामें एक बड़ा Crunch और अगले बड़ाBang के बीच *कोई आंतरकि समय नहींगुजरता*— क्योंकि उस अंतराल में एंट्रॉपीकावनिमिय नहींहोता— जबकि प्रयोगशालाघड़ीचलतीरहतीहै। पूरे डेटासमूह में दोनोंक्षेत्रोंकीकुल एंट्रॉपीत्रुटि-सीमाओं के भीतर स्थरि रही जैसाबंद तंत्र से अपेक्षति है।
- **अलग अवस्थाएँ अलग "समय" देतीहैं।** बाधाऊँचीकरें तोएंट्रॉपीकावनिमिय घटताहै और आंतरकि घड़ीधीमीचलतीहै। जब दोनोंक्षेत्र लगभग अलग होजाते हैं, उज्ज्वल क्षेत्र उस अवस्थाकीओर पहुँचताहै जसिे शोधपत्र "**ऊष्मामृत्यु (heat death)**" कहताहै: एक स्थरि अवस्थाजसिमें एंट्रॉपिक समय रुक जाताहै।
- **प्रभावीसमीकरण डेटाकोदोहरासकतीहै।** प्रयोगात्मक पैरामीटर के साथ एंट्रॉपिक-समय Schrödinger समीकरण बदल की मापीगई चौड़ाई के वकिास कोसंख्यात्मक रूप से दोहरातीहै। शोधपत्र कम-बाधावाले मामले में बहुत अच्छामेल रपिोर्ट करताहै, जहाँएंट्रॉपी-प्रेरति पद प्रमुख है; स्पष्ट संख्यात्मक तुलनाइसीमामले के लिए कीगई।

"समय कीसमस्या" और यहाँ"एंट्रॉपिक समय" काक्यामतलब है

समय कीसमस्यायह है कि कैनोनिकिल क्वांटम गुरुत्वाकर्षण कीमुख्य समीकरण (Wheeler-DeWitt) में बहरी समय-चर नहींहै। एक सामान्य संबंधपरक जवाब यह है कि तंत्र के भीतर कीकिसीभौतिकि राशि को"घड़ी" बनायाजाए और बाकीसब कुछ उसके सापेक्ष बतायाजाए। बार-बार आने वालीकठनाई यह है कि स्वाभाविकि घड़ीविकल्प हमेशा एक हीदशिामें नहींचलते — दोबारासकिुड़ने वालातंत्र कसिीउम्मीदवार घड़ीकोपहले आगे और फरि पीछे चलासकता है — इसलिए वह शुरुआत से अंत तक साफ़ क्रम नहींदे पाती।
एंट्रॉपिक समय इस कठनिाई से बचने काBarontini कातरीकाहै। स्थतिि-जैसीराशि पढ़ने के बजाय घड़ीदेखे और न देखे गए क्षेत्रोंके बीच अदलाबदलीहुई *एंट्रॉपी*से बनतीहै, और इसकीरचनाऐसीहै कि वह उलटीन चले। वचिार की दृष्टि से यह पुराने "थर्मल टाइम" प्रस्तावोंसे जुड़ाहै, लेकनि यहाँइसे कसिीअमूर्त गणतिीय संरचनासे नहींबल्कि मापने योग्य एंट्रॉपी-प्रवाह से परचिालनात्मक रूप में परभिाषति कयिागयाहै — इसलिए इसे वास्तवकि उपकरण पर परखाजासकताहै।
महत्वपूर्ण बात यह है कि ब्रह्मांड-वज्ञिान के शब्द — "बड़ाBang", "बड़ाCrunch", "scale factor", "scalar field", "miniuniverse" — **अनुरूप मॉडल के लेबल** हैं। वे ट्रैप में बंद परमाणु-गैस कीउन वशिेषताओं कोनाम देते हैं जोसरल कएि गए ब्रह्मांडीय मॉडल कीसमीकरणोंसे *संरचनात्मक रूप से मलिती-जुलती*हैं। वे वास्तवकि ब्रह्मांड

> के बारे में कथन नहीं हैं।

यह क्या साबित नहीं करता

यहाँ सबसे अधिक सावधानी जरूरी है, क्योंकि शब्दावली आसानी से दावे को जरूरत से ज़्यादा बड़ा बना सकती है।

- **यह समय की समस्या हल नहीं करता और ऐसा दावा भी नहीं करता।** शोधपत्र अपनी रूपरेखा में कहता है कि यह “एक नियंत्रित प्रयोगात्मक व्यवस्था स्थापित करता है जिसमें संबंधपरक-समय की रचनाओं को मात्रात्मक रूप से परखा जा सकता है।” परीक्षण-मंच कोई प्रमेय नहीं है। संबंधपरक या एंट्रॉपिक समय क्वांटम गुरुत्वाकर्षण में समय का *सही* विवरण है या नहीं, यह सवाल पहले की तरह खुला है।
- **यह अनुरूप मॉडल है, ब्रह्मांड नहीं।** यहाँ ब्रह्मांड-विज्ञान का अवलोकन नहीं हो रहा। ट्रैप में Bose-Einstein condensate देखा जा रहा है और उसका संक्षिप्त वर्णन एक सरल किए गए (“minisuperspace”) ब्रह्मांडीय मॉडल से *गणितीय रूप से मिलता-जुलता* है। यह समानता प्रयोग का उद्देश्य भी है और उसकी सीमा भी। यहाँ कुछ भी यह नहीं दिखाता कि शुरुआती ब्रह्मांड में इसी तरह बड़ा Bang हुआ, स्पेस ठहरे परमाणुओं से बना है, या “समय अस्तित्व में नहीं है।”
- **यह नहीं दिखाता कि समय “असल में” एंट्रॉपी है।** एंट्रॉपिक घड़ी एक निर्मित क्रम है जो इस तंत्र पर अच्छी तरह काम करता है। शोधपत्र थर्मल-टाइम परिकल्पना से वैचारिक समानता दर्ज करता है, लेकिन यह भी खुला छोड़ता है कि दोनों वास्तव में एक ही चीज़ हैं या नहीं। “एंट्रॉपी से बनी आंतरिक घड़ी इस प्रयोग को क्रम दे सकती है” बहुत सीमित दावा है; “समय एंट्रॉपी है” नहीं।
- **प्रभावी समीकरण एक मॉडलिंग परिणाम है, क्वांटम यांत्रिकी का पुनर्लेखन नहीं।** निकाली गई एंट्रॉपिक-समय Schrödinger समीकरण धीमे एंट्रॉपी-प्रवाह पर सामान्य क्वांटम यांत्रिकी की ओर घटती है और पूरी तरह सामान्य यूनिटरी सिद्धांत तभी बनती है जब एंट्रॉपी-प्रवाह शून्य हो। शोधपत्र इसे मानक समीकरण से अधिक सामान्य *विशेष रूप से तब* बताता है जब देखा जा रहा तंत्र ऊष्मागतिकी रूप से न देखे जा रहे तंत्र के लिए खुला हो— यह ऐसे खुले उपतंत्रों के बारे में कथन है, मूलभूत भौतिकी को अनिवार्य रूप से इसी तरह देखने वाला लिखने का दावा नहीं।
- **यह एक प्रयोग, एक लेखक और एक घड़ी-विकल्प है।** नतीजों में प्रति बिंदु लगभग 5% सांख्यिकीय अनिश्चितता है और मीन-फील्ड तथा औसत-घनत्व सन्निकटनों का उपयोग होता है। चुनी हुई घड़ी और कोर्स-ग्रेनिंग जानबूझकर किए गए मॉडलिंग-निर्णय हैं, जिन्हें व्यापक संरचनात्मक निष्कर्ष निकालने से पहले दूसरे समूह भी परखना चाहेंगे।

साक्ष्य कितना मजबूत है

जिस सीमित दावे के लिए प्रयोग बनाया गया है, उसके लिए साक्ष्य साफ़ है। संबंधित समय-मान पर तंत्र सचमुच अच्छी तरह अलग-थलग है, एंट्रॉपी का हिसाब बंद होता है (कुल एंट्रॉपी त्रुटि के भीतर स्थिर रहती है), आंतरिक घड़ी डेटा को लगभग हर जगह एक ही दिशा में क्रम देती है, और उसी मॉडल से लेखक द्वारा निकाली गई प्रभावी समीकरण डेटा से अनुमानित पैरामीटर के साथ कम-बढ़ावा वाले मामले की मापी गई गतिशीलता को दोहराती है। डेटा खुले तौर पर उपलब्ध है। यह वास्तव में, नियंत्रित तंत्र का वास्तव में मापन है, केवल विचार-प्रयोग नहीं।

लेकिन इससे निकाले जा सकने वाले बड़े निष्कर्ष उतने ही सीमित हैं। सब कुछ संक्षिप्त कंडेन्सेट मॉडल और minisuperspace ब्रह्मांड-विज्ञान के बीच समानता पर टिका है, और ऐसी समानताएँ समझने में मदद करती हैं, साबित नहीं करतीं। एक ही प्रयोगात्मक मंच पर एक लेखक द्वारा एक आंतरिक-समय विधि का काम करना अवधारणा-प्रमाण के रूप में मजबूत है; प्रकृति में समय वास्तव में कैसे व्यवहार करता है, इस पर बड़े दावे के लिए कमजोर आधार है। सही पढ़ाई यह है: अब इस

विचार को प्रयोगशाला में *लागू* और परखा जा सकता है।

यह क्यों मायने रखता है

समय की समस्या पर बहस लंबे समय से गणितीय औपचारिकता में अटकी रही है, जहाँ प्रतिस्पर्धी प्रस्तावों को गलत साबित करना कठिन है क्योंकि ठोस, मापने योग्य भविष्यवाणियाँ कम हैं। उस बहस के एक हिस्से को भी प्रयोग में बदलना — जहाँ आंतरिक घड़ी डेटा को क्रम देती है या नहीं, प्रभावी समीकरण मेल खाती है या नहीं — चर्चा की प्रकृति बदल देता है। सिद्धांतकारों को अपनी गणितीय मशीनरी परखने के लिए एक प्रयोगात्मक मंच मिलता है।

यही वास्तविक योगदान है: समय का उत्तर नहीं, बल्कि **प्रश्न को मात्रात्मक रूप से पूछने की जगह**। ठंडे-परमाणु मंच Hawking विकिरण, फैलते ब्रह्मांड और false-vacuum decay के नियंत्रित अनुरूप मॉडल पहले ही दे चुके हैं; यह संबंधपरक समय और समय के तीर को भी उस प्रयोगात्मक औज़ार-पेटी में जोड़ता है। असली मूल्य आगे के प्रयोगों में है — अलग घड़ी-विकल्प, उछलते बनाम singular व्यवहार, प्रतिवर्तनीयता के परीक्षण — जिन्हें अब केवल गणना नहीं, माप भी जा सकता है।

साफ़ सारांश

एक भौतिकविद ने Bose-Einstein condensate बनाकर उसे पतली ऑप्टिकल बाधा से देखे और न देखे गए हिस्सों में बाँटा और उनके बीच बहने वाली एंट्रॉपी से एक आंतरिक “एंट्रॉपिक समय” बनाया। यह घड़ी देखे गए हिस्से के विस्तार और दोबारा सिकुड़ने के चक्र को क्रम देती है, एंट्रॉपी विनिमय होने पर तेज चलती है और विनिमय न होने पर रुक जाती है। इसी आंतरिक समय में लिखी प्रभावी समीकरण कम-बाधा वाले मामले में मापे गए डेटा को दोहराती है। यह व्यवस्था कैनोनिकल क्वांटम गुरुत्वाकर्षण की “समय की समस्या” का अनुरूप मॉडल है: “बड़ा Bang”, “बड़ा Crunch” और “miniuniverse” ट्रैप में बंद गैस के उन पहलुओं के नाम हैं जो सरल किए गए ब्रह्मांडीय मॉडल से गणितीय रूप से मिलते-जुलते हैं। यह संबंधपरक-समय के विचारों का नियंत्रित परीक्षण-मंच है — समय की समस्या का समाधान नहीं, वास्तविक ब्रह्मांड पर दावा नहीं और “समय असल में एंट्रॉपी है” का साक्ष्य नहीं।

बिना बढ़ा-चढ़ाकर जाँच

शोधपत्र क्या दिखाता है: एक अच्छी तरह अलग-थलग ठंडे-परमाणु तंत्र में एंट्रॉपी विनिमय से परिभाषित आंतरिक घड़ी देखी गई गतिशीलता को एक ही दिशा में क्रम दे सकती है, और कम-बाधा वाले मामले में प्रभावी “एंट्रॉपिक-समय” समीकरण मापे गए विकास को दोहराती है।

क्या संभव है लेकिन दिखाया नहीं गया: एंट्रॉपिक या संबंधपरक समय वास्तविक क्वांटम गुरुत्वाकर्षण में समय का अच्छा विवरण हो सकता है। प्रयोग इन रचनाओं को गंभीरता से परखने योग्य बनाता है; प्रकृति के लिए उनकी पुष्टि नहीं करता।

यह क्या नहीं दिखाता: समय की समस्या हल हो गई; क्वांटम गुरुत्वाकर्षण हल हो गया; ब्रह्मांड इसी तरह बड़ा Bang से शुरू हुआ; सुपरसिमेट्रिक परमाणुओं से उभरता है; या “समय अस्तित्व में नहीं है।”

मुख्य सीमाएँ: एक प्रयोगात्मक मंच, एक लेखक, एक घड़ी-विकल्प; प्रति बिंदु लगभग 5% अनिश्चितता; मीन-फील्ड और औसत-घनत्व सन्निकटन; और सबसे बढ़कर ट्रैप में बंद कंडेन्सेट तथा सरल किए गए ब्रह्मांडीय मॉडल के बीच समानता

पर निर्भरता।

सामान्य पाठक को कितना भरोसा रखना चाहिए? अपने तंत्र के बारे में प्रयोग ने जो रिपोर्ट किया, उसमें उच्च भरोसा। इस अनुरूप मॉडल से वास्तविक ब्रह्मांड में समय के बारे में छलाँग लगाने वाले दावों में कम भरोसा।

स्रोत

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