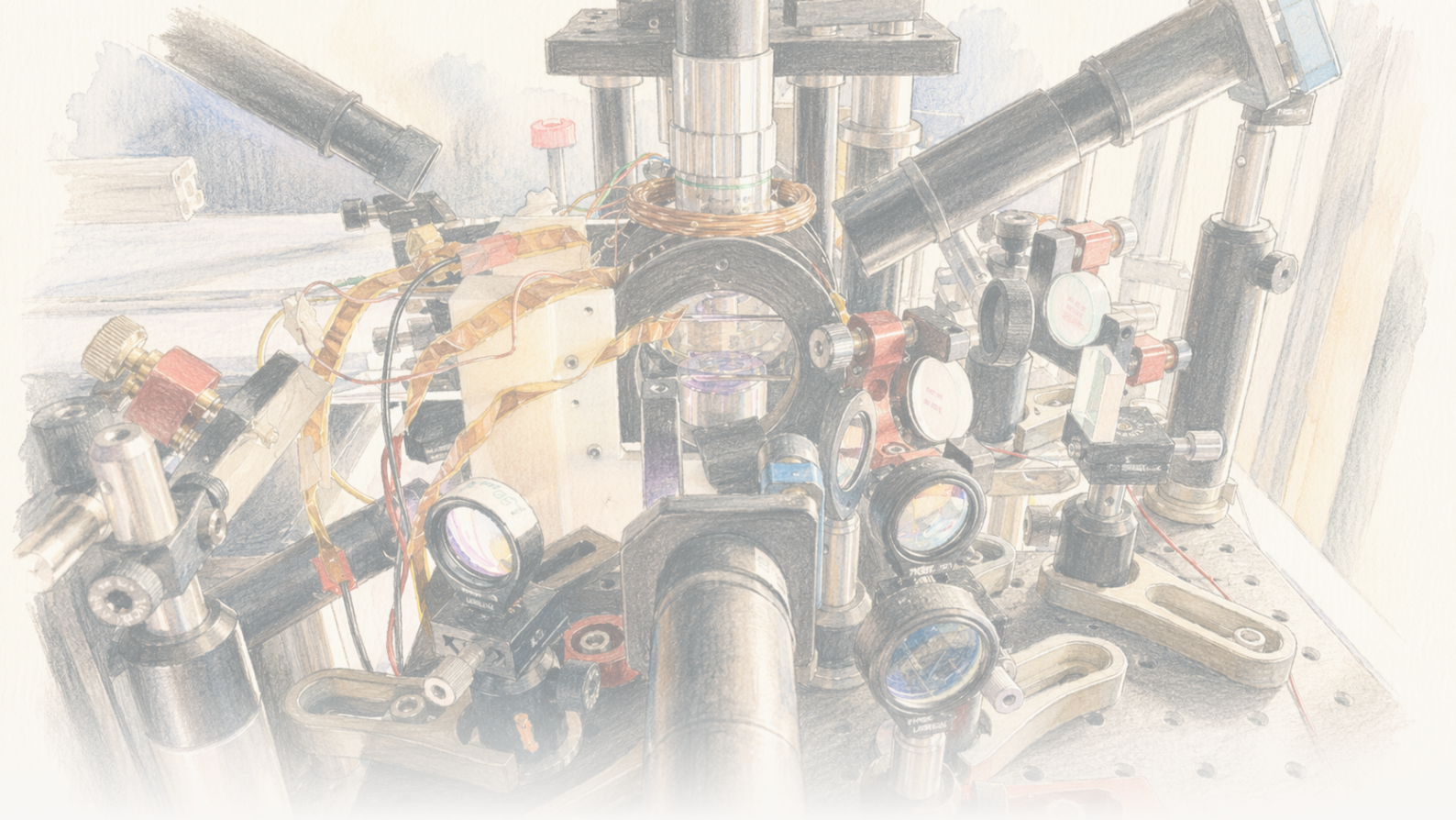

The Clean Paper

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 नहींहोती— 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 एंट्रॉपीसे बनीघड़ी

कैनोनिकल क्वांटम गुरुत्वाकर्षण में एक अजीब और लंबे समय से चलीआ रहीपहेलीहै: उसकीकेंद्रीय समीकरण में समय हीनहींहै। Wheeler-DeWitt समीकरण, जिसे पूरे ब्रह्मांड के लिए Schrödinger समीकरण कासबसे करीबीसमकक्ष कहाजा सकताहै, बस यह कहताहै कि अवस्थापर एक निश्चित ऑपरेटर लगाने कापरिणाम शून्य है। कोई बाहरीपैरामीटर टिक-टिक नहींकरता, “पहले” और “बाद में” काक्रम तय करने वालीकोई चीज़ नहींहै — फिर भीहम समय कोगुजरते हुए अनुभव करते हैं। यही**समय कीसमस्या(problem of time)** है, और आधीसदीसे अधिक समय से इसकासमाधान नहींमिलाहै।

भौतिकी समीक्षाResearch में प्रकाशित एकल-लेखक शोधपत्र इसे हल नहींकरता। वह कुछ अधिक सीमित, लेकिन अपने तरीके से उपयोगीकाम करताहै: एक छोटाऔर अच्छीतरह नियंत्रित प्रयोगशालातंत्र बनाताहै जिसमें प्रस्तावित उत्तरों के एक परिवार को**वास्तविक डेटाके सामने परखा**जासके। विश्वविद्यालय of Birmingham के Giovanni Barontini एक Bose-Einstein condensate — अत्यंत ठंडे परमाणुओं काबादल जोएक समूहकि क्वांटम वस्तु कीतरह व्यवहार करताहै — कोऐसे अनुरूप तंत्र में बदलते हैं जिसमें “आंतरिक” यासंबंधपरक समय के विचार कोकेवल बहस काविषय रखने के बजाय मापाजासके। तरकीब यह है कि घड़ीबाहर कीस्टॉपवॉच से नहीं बल्कि तंत्र के भीतर इधर-उधर होने वाले एंट्रॉपीविनिमय से बनाई जाए।

“समय कीसमस्याकानियंत्रित अनुरूप मॉडल” और “भौतिकविदोंने समय कीसमस्याहल कर दी” के बीच कीदूरीहीइस कहानी कासबसे महत्वपूर्ण हिस्साहै — और यह दूरीबहुत बड़ीहै।

शोधकर्ताने क्याकिया

उपकरण में लगभग **24,000 रुबिडियम-87 परमाणुओं** काकंडेन्सेट है, जिसे संरक्षीऑप्टिकल डिपोल ट्रैप में रखकर दोलन कराया गया— पूरापरमाणु-बादल ट्रैप में आगे-पीछे झूलताहै। एक **पतलीऑप्टिकल बाधा**— लगभग 8 माइक्रोन चौड़ी डिजिटल माइक्रोमिरर डिवाइस से 675 nm प्रकाश के जरिए बनाई गई — ट्रैप कोदोहिस्सोंमें बाँटतीहै। एक आधादेखा जाताहै (“**उज्ज्वल क्षेत्र**”), दूसरानहीं(“**अदृश्य क्षेत्र**”)। प्रयोग कीलगभग 100-मिलीसेकंड अवधि में मापने योग्य कण-हानि याअपव्यय नहींदिखा, इसलिए अच्छे सन्निकटन में तंत्र बंद है और उसकाहैमिल्टोनियन स्वयं समय पर निर्भर नहींकरता।

[figure_pair pending]

बाईं ओर मैग्नेटोऑप्टिकल ट्रैप काँच कीकोशिकाके भीतर रुबिडियम परमाणुओं काठंडाबादल बनाताहै — कंडेन्सेट तैयार करने का शुरुआतीशीतलन चरण। दाईं ओर Giovanni Barontini ऑप्टिकल उपकरण के पास खड़े हैं। ये प्रयोगशालातंत्र कीतस्वीरें हैं, किसी वास्तविक लघु ब्रह्मांड कीनहीं।

समान्य प्रयोगशालाघड़ीसे देखें — हर 2 ms पर अवशोषण-चित्र — तोउज्ज्वल क्षेत्र कुछ ऐसाकरताहै जिसकीभाषा ब्रह्मांड-विज्ञान कीयाद दिलातीहै। परमाणु बाधापार करते हैं और यह क्षेत्र लगभग शून्य से बढ़ताहै (Barontini इस क्षण को“**बड़ाBang**” कहते हैं), अधिकतम विस्तार तक जाताहै, फिर सिकुड़ताहै और अदृश्य हिस्से में खालीहोजाताहै (“**बड़ाCrunch**”)। बाधाकीऊँचाई के अनुसार यह चक्र बार-बार होसकताहै।

फिर असलीसवाल आताहै। प्रयोगशालाघड़ीतंत्र के *बाहर* है — ठीक वहीचीज़ जोWheeler-DeWitt व्यवस्थामें उपलब्ध नहींहोती। इसलिए Barontini पूछते हैं: क्याउज्ज्वल क्षेत्र के इतिहास को**केवल तंत्र के भीतर कीराशियोंसे क्रम दिया जासकताहै**? उनकाउत्तर एक घड़ीहै जिसे वे **एंट्रॉपिक समय (entropic time)** कहते हैं। इसे उन्हींचित्रोंसे तीन साधारण चरणोंमें पढ़ाजाताहै। पहले हर अवशोषण-चित्र से उज्ज्वल क्षेत्र कीचार राशियाँनिकालीजातीहैं: परमाणुओं कीसंख्या, घनत्व-प्रोफ़ाइल कादिग्व्यमान-केंद्र (जोअनुरूप मॉडल में “स्केलर फील्ड” कीभूमिकानिभाताहै), उसकीचौड़ाई और एंट्रॉपी

— मानक विधि से मिलीप्रति-परमाणु एंट्रॉपीको परमाणु संख्या से गुणा करके। दूसरा परमाणु बाधा पार करते हैं तो एंट्रॉपी बढ़ती और घटती है। तीसरा घड़ी माने गए द्रव्यमान-केंद्र के मार्ग के साथ एंट्रॉपी ढाल का अनुसरण करती है और हर विस्थापन की दिशा नहीं, उसका परिमाण गिनती है। जब एंट्रॉपी और द्रव्यमान-केंद्र साथ में बढ़ें या घटें, तो बदल दिशा बदलने पर भी हर कदम घड़ी को आगे बढ़ाता है। डेटा में इससे क्षेत्र के “बड़ा Bang” से “बड़ा Crunch” तक लगभग हर जगह एक ही दिशा वाला क्रम मिलता है; केवल कुछ छोटे उतार-चढ़ाव हैं, जहाँ मोटे समय-नमूनाकरण के कारण दोनों बदलाव असहमत दिखते हैं।

अंत में वे एक प्रभावी **“एंट्रॉपिक-समय Schrödinger समीकरण”** निकालते हैं — उज्ज्वल क्षेत्र के विकास की ऐसी समीकरण जिसमें बाहरी समय की जगह यह आंतरिक घड़ी इस्तेमाल होती है — और उसे संख्यात्मक रूप से हल करके देखते हैं कि क्या वह कैमरे से दर्ज विकास को दोहरा सकती है।

क्या मिला

महत्त्व की आकांक्षा के बढ़ते क्रम में तीन नतीजे हैं:

- **आंतरिक घड़ी क्रम देने का काम करती है।** एंट्रॉपिक समय लगभग हर जगह एक ही दिशा में बढ़ता है और उसकी गति इस पर निर्भर करती है कि बाधा के पार एंट्रॉपी कितनी तेज़ी से अदला-बदली हो रही है: विनिमय तेज़ हो तो घड़ी तेज़ चलती है और **जब एंट्रॉपी का कोई विनिमय नहीं होता तो पूरी तरह रुक जाती है।** प्रतिवर्ती, कम-बाधा वाली अवस्था में एक बड़ा Crunch और अगले बड़ा Bang के बीच *कोई आंतरिक समय नहीं गुज़रता* — क्योंकि उस अंतराल में एंट्रॉपी का विनिमय नहीं होता — जबकि प्रयोगशाला घड़ी चलती रहती है। पूरे डेटा-समूह में दोनों क्षेत्रों की कुल एंट्रॉपी त्रुटि-सीमाओं के भीतर स्थिर रही, जैसा बंद तंत्र से अपेक्षित है।
- **अलग अवस्थाएँ अलग “समय” देती हैं।** बाधा ऊँची करें तो एंट्रॉपी का विनिमय घटता है और आंतरिक घड़ी धीमी चलती है। जब दोनों क्षेत्र लगभग अलग हो जाते हैं, उज्ज्वल क्षेत्र उस अवस्था की ओर पहुँचता है जिसे शोध पत्र “**ऊष्मा-मृत्यु (heat death)**” कहता है: एक स्थिर अवस्था जिसमें एंट्रॉपिक समय रुक जाता है।
- **प्रभावी समीकरण डेटा को दोहरा सकती है।** प्रयोगात्मक पैरामीटर के साथ एंट्रॉपिक-समय Schrödinger समीकरण बदल की मापी गई चौड़ाई के विकास को संख्यात्मक रूप से दोहराती है। शोध पत्र कम-बाधा वाले मामले में बहुत अच्छा मेल रिपोर्ट करता है, जहाँ एंट्रॉपी-प्रेरित पद प्रमुख है; स्पष्ट संख्यात्मक तुलना इसी मामले के लिए की गई।

“समय की समस्या” और यहाँ “एंट्रॉपिक समय” का क्या मतलब है

समय की समस्या यह है कि क्वांटम गुरुत्वाकर्षण की मुख्य समीकरण (Wheeler-DeWitt) में बाहरी समय-चर नहीं है। एक सामान्य संबंधपरक जवाब यह है कि तंत्र के भीतर की किसी भौतिक राशि को “घड़ी” बनाया जाए और बाकी सब कुछ उसके सापेक्ष बताया जाए। बार-बार आने वाली कठिनाई यह है कि स्वाभाविक घड़ी विकल्प हमेशा एक ही दिशा में नहीं चलते — दोबारा सिकुड़ने वाला तंत्र किसी उम्मीदवार घड़ी को पहले आगे और फिर पीछे चला सकता है — इसलिए वह शुरुआत से अंत तक साफ़ क्रम नहीं दे पाती।

एंट्रॉपिक समय इस कठिनाई से बचने का Barontini का तरीक़ा है। स्थिति-जैसी राशि पढ़ने के बजाय घड़ी देखे और न देखे गए क्षेत्रों के बीच अदला-बदली हुई *एंट्रॉपी* से बनती है, और इसकी रचना ऐसी है कि वह उलटी न चले। विचार की दृष्टि से यह पुराने “थर्मल टाइम” प्रस्तावों से जुड़ा है, लेकिन यहाँ इसे किसी अमूर्त गणितीय संरचना से नहीं बल्कि मापने योग्य एंट्रॉपी-प्रवाह से परिचालनात्मक रूप में परिभाषित किया गया है — इसलिए इसे वास्तविक उपकरण पर परखा जा सकता है।

महत्त्वपूर्ण बात यह है कि ब्रह्मांड-विज्ञान के शब्द — “बड़ा Bang”, “बड़ा Crunch”, “scale factor”, “scalar field”, “miniuniverse” — **अनुरूप मॉडल के लेबल** हैं। वे ट्रैप में बंद परमाणु-गैस की उन विशेषताओं को नाम देते हैं जो सरल किए गए ब्रह्मांडीय मॉडल की समीकरणों से *संरचनात्मक रूप से मिलती-जुलती* हैं। वे वास्तविक 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 ज्यादा 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, स्पेसटाइम 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 मॉडलगत परिणाम है, क्वांटम यांत्रिकी का पुनर्लेखन नहीं।** निकाली गई एंट्रॉपिक-समय Schrödinger समीकरण धीमे एंट्रॉपी-प्रवाह पर समान्य 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 ऊष्मागतिक 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 दोबारा 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 मॉडलगत-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 तृटि 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-बाधा 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; स्पेसटाइम 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।

समान्य 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।

सन्दर्भ

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