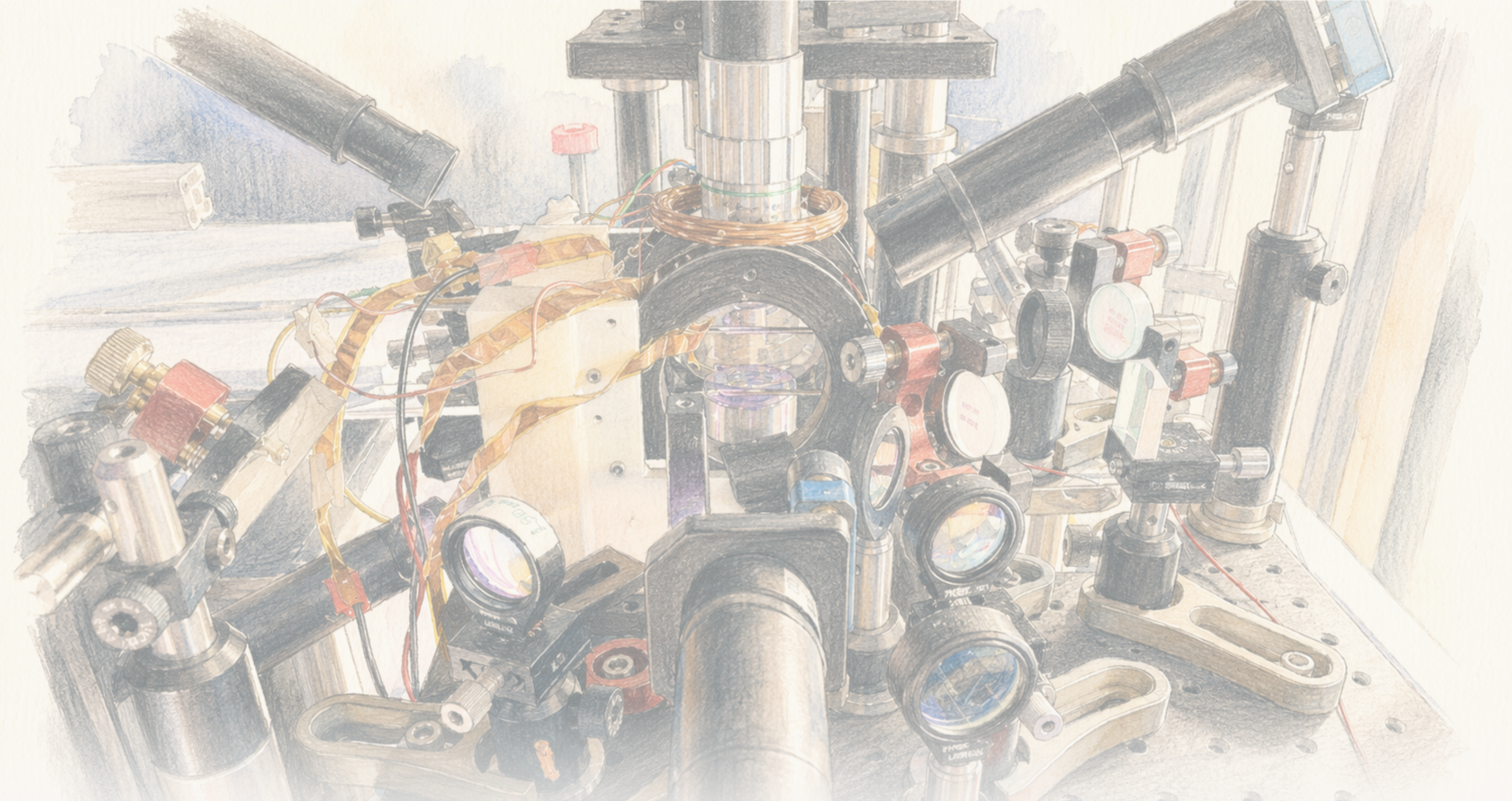

The Clean Paper

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

ایٹم-Cold تجربہ کوانٹم کششِ ثقل کے 'مسئلہ of وقت' کو آزماتا ہے — تجربہ گاہ analog کے طور پر، جواب کے طور پر نہیں

Canonical کوانٹم کششِ ثقل میں *Wheeler-DeWitt* مساوات کے پاس واقعات کو ترتیب دینے کے لیے *external* گھڑی نہیں: یہی "مسئلہ *of* وقت" ہے۔ ایک واحد-مصنف تجربہ *condensate Bose-Einstein* کو *isolate* کرتا ہے، باریک *optical barrier* سے مشاہدہ شدہ اور *unobserved* شعبے میں تقسیم کرتا ہے، اور دونوں کے درمیان اینٹروپی بہاؤ سے داخلی گھڑی بناتا ہے۔ یہ "*entropic* وقت" مشاہدہ شدہ شعبہ کے *expansion* اور *recollapse* کو ترتیب کرتی ہے، اور مؤثر مساوات آزمائے گئے کم-*barrier* صورت میں ناپی گئی اعداد و شمار *reproduce* کرتی ہے۔ یہ وقت-*relational ideas* کا کنٹرول شدہ *testbed* ہے: "بڑا *bang*"، "بڑا *crunch*" اور "*miniuniverse*" *trapped gas* کے *analog labels* ہیں، حقیقی *cosmology* نہیں، اور کام مسئلہ *of* وقت یا کوانٹم کششِ ثقل حل کرنے کا دعویٰ نہیں کرتا۔

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: -1103/1h9j.10 df4k

ایک trap کے اندر، اینٹروپی سے بنی گھڑی

معیاری کوانٹم کششِ ثقل میں ایک عجیب اور دیرینہ مسئلہ ہے: اس کی مرکزی مساوات میں وقت موجود ھی نہیں۔ Wheeler-DeWitt مساوات، جسے پورے کائنات کے لیے Schrodinger مساوات کی قریب ترین چیز کہا جا سکتا ہے، بس یہ کہتی ہے کہ ایک خاص آپریٹر حالت پر عمل کرے تو نتیجہ صفر ہوتا ہے۔ کوئی بیرونی پیرامیٹر نہیں جو چیچڑ کرے، کوئی چیز نہیں جو "پہلے" اور "بعد" کو ترتیب دے — پھر بھی ہم وقت گزرتا ہوا صاف محسوس کرتے ھیں۔ یہی **مسئلہ وقت کا ہے**، اور نصف صدی سے زیادہ عرصے سے اس کا حل نہیں ملا۔

طبیعی جائزہ تحقیق میں ایک مصنف کا یہ مقالہ اس مسئلے کو حل نہیں کرتا۔ اس کا کام زیادہ محدود اور، اپنے انداز میں، زیادہ کارآمد ہے: یہ تجربہ گاہ میں ایک چھوٹا، اچھی طرح کنٹرول شدہ نظام بناتا ہے جس میں مجوزہ جوابات کے ایک خاندان کو **حقیقی اعداد و شمار کے مقابلے میں آزمایا** جا سکتا ہے۔ University of Birmingham کے Giovanni Barontini ایک Bose-Einstein منجمد مادہ — انتہائی سرد ایٹم کا بادل جو ایک کوانٹم جسم کی طرح برتاؤ کرتا ہے — لیتے ھیں اور اسے ایسے مثالی ھم شکل میں بدلتے ھیں جہاں "داخلی" یا تعلقی وقت کے تصور پر صرف بحث نہیں بلکہ پیمائش کی جا سکے۔ ترکیب یہ ہے کہ گھڑی باھر کی stopwatch سے نہیں، بلکہ اس اینٹروپی سے بنائی جائے جسے نظام اپنے اندر ایک حصے سے دوسرے حصے تک منتقل کرتا ہے۔

"مسئلہ وقت کا کا کنٹرول شدہ مثالی ھم شکل" اور "طبیعیات دان نے وقت حل کر لیا" کے درمیان جو فاصلہ ہے، وھی اس کہانی کا اھم حصہ ہے — اور یہ فاصلہ بہت بڑا ہے۔

محقق نے کیا کیا

آلہ تقریباً **24,000 rubidium-87** ایٹم کے منجمد مادہ پر مشتمل ہے، جسے conservative بصری dipole trap میں رکھا گیا اور oscillate کرایا گیا — پورا atomic بادل trap کے اندر آگے پیچھے جھولتا ہے۔ ایک **باریک بصری رکاوٹ** — تقریباً 8 microns چوڑی، 675 nm روشنی سے digital micromirror device کے ذریعے بنائی گئی — trap کو دو حصوں میں تقسیم کرتی ہے۔ ایک حصہ دیکھا جاتا ہے ("**روشن شعبہ**")؛ دوسرا نہیں ("**dark شعبہ**")۔ تقریباً 100-millisecond کی تجرباتی مدت میں ذرہ نقصان یا dissipation قابلِ پیمائش نہیں تھا، اس لیے اچھی تقریب میں یہ ایک closed نظام ہے جس کا Hamiltonian خود وقت پر منحصر نہیں۔

[figure_pair pending]

بائیں طرف magneto-بصری trap شیشے کے خلیہ کے اندر rubidium ایٹم کا سرد بادل بناتا ہے: منجمد مادہ تیار کرنے کے راستے میں cooling کا ابتدائی مرحلہ۔ دائیں طرف Giovanni Barontini بصری آلاتی نظام کے پاس کھڑے ہیں۔ یہ تجربہ کے پیچھے تجربہ گاہ نظام کی تصاویر ھیں، کسی حقیقی miniature کائنات کی نہیں۔

عام تجربہ گاہ گھڑی سے دیکھا جائے — ھر 2 ms پر ایک جذب تصویر — تو روشن شعبہ ایک دلچسپ حرکت کرتا ہے۔ ایٹم رکاوٹ عبور کرتے ھیں اور شعبہ صفر سے بڑھتا ہے (Barontini اس لمحے کو "**بڑا بینگ**" کہتے ھیں)، زیادہ سے زیادہ پھیلاؤ تک پہنچتا ہے، پھر سکڑتا ہے اور واپس dark جانب میں خالی ہو جاتا ہے ("**بڑا crunch**")۔ رکاوٹ کی اونچائی کے مطابق یہ چکر بار بار ہو سکتی ہے۔

پھر اصل نکتہ آتا ہے۔ تجربہ گاہ گھڑی نظام کے باھر ہے — بالکل وھی قسم کی چیز جس کی Wheeler-DeWitt ترتیب اجازت نہیں دیتی۔ اس لیے Barontini پوچھتے ھیں: کیا روشن شعبہ کی تاریخ کو **صرف نظام کے اندر موجود مقادیر سے ترتیب** دیا جا سکتا ہے؟ ان کا جواب ایک گھڑی ہے جسے وہ **اینٹروپی پر مبنی وقت** کہتے ھیں، اور جسے انھی تصاویر سے تین سیدھے مرحلوں میں نکالا جاتا

ہے۔ پہلے، ہر جذب تصویر سے روشن شعبہ کے لیے چار اعداد لیے جاتے ہیں: ایٹم عدد، کثافت خاکہ کا مرکزِ کمیت (جو مثالی ہم شکل scalar "میدان" کا کردار ادا کرتا ہے)، چوڑائی، اور اینٹروپی — فی ایٹم اینٹروپی کو ایٹم عدد سے ضرب دے کر، ایک معیاری طریقہ سے۔ دوسرا، جب ایٹم رکاوٹ عبور کرتے ہیں تو یہ اینٹروپی بڑھتی اور گھٹتی ہے۔ تیسرا، گھڑی ناپی گئی مرکز-of-کمیت راستہ کے ساتھ اینٹروپی ڈھلوان کو پیروی کرتی ہے، ہر منتقلی کی سمت کے بجائے اس کی مقدار گنتی ہے۔ جب اینٹروپی اور مرکزِ کمیت دونوں ایک ساتھ بڑھتے یا گھٹتے ہیں تو ہر قدم گھڑی کو آگے لے جاتا ہے، حتیٰ کہ بادل سمت الٹی کر دے۔ اعداد و شمار میں اس طرح شعبہ کے "بڑا بینگ" سے "بڑا crunch" تک تقریباً ہر جگہ ایک ھی ترتیب بنتی ہے، صرف چند چھوٹے چھوٹے اتار چڑھاؤ کے ساتھ جہاں کم باریک نمونہ گیری کی وجہ سے دونوں تبدیلیاں آپس میں ہم آہنگ نہ ہونا کرتی ہیں۔

آخر میں وہ ایک مؤثر "**اینٹروپی پر مبنی-وقت Schrodinger مساوات**" اخذ کرتے ہیں — روشن شعبہ کے لیے evolution مساوات جو external وقت کے بجائے اس داخلی گھڑی میں لکھی گئی ہے — اور اسے عددی طور پر حل کرتے ہیں تاکہ دیکھا جا سکے کہ کیا یہ کیمرا میں ریکارڈ ہونے والی حرکت کو دوبارہ پیدا کرتی ہے۔

کیا ملا

تین نتائج، کم سے زیادہ ambitious ترتیب میں۔

- **داخلی گھڑی ترتیب دینے کے لیے کام کرتی ہے۔** اینٹروپی پر مبنی وقت تقریباً ہر جگہ monotonically بڑھتی ہے، اور اس کی رفتار اس بات سے طے ہوتی ہے کہ اینٹروپی رکاوٹ کے پار کتنی تیزی سے تبادلہ ہو رہی ہے: تبادلہ زیادہ ہو تو گھڑی تیز چلتی ہے، **اور جب تبادلہ بالکل نہ ہو تو مکمل رک جاتی ہے۔** reversible، کم-رکاوٹ دائرۂ حالات میں ایک بڑا crunch اور اگلے بڑا بینگ کے درمیان کوئی داخلی وقت نہیں گزرتا — کیونکہ وہاں اینٹروپی تبادلہ نہیں ہوتی — اگرچہ تجربہ گاہ گھڑی چلتی رہتی ہے۔ پورے ڈیٹا سیٹ میں دونوں شعبے کی کل اینٹروپی غلطی سلاخیں کے اندر مستقل رہی، جیسا کہ closed نظام میں ہونا چاہیے۔
- **مختلف دائرے مختلف "اوقات" دیتے ہیں۔** رکاوٹ بڑھائیں تو اینٹروپی تبادلہ کم ہوتی ہے، اس لیے داخلی گھڑی آہستہ چلتی ہے۔ اسے وہاں تک لے جائیں جہاں دونوں شعبے تقریباً الگ ہو جائیں، تو روشن شعبہ اس حالت کی طرف جاتا ہے جسے مقالہ "**حرارت موت**" کہتا ہے: stationary حالت جہاں اینٹروپی پر مبنی وقت بس رک جاتی ہے۔
- **ایک مؤثر مساوات اعداد و شمار کو دوبارہ پیدا کرتی ہے۔** تجرباتی پیرامیٹرز کے ساتھ اینٹروپی پر مبنی-وقت Schrodinger مساوات بادل کی ناپی گئی چوڑائی evolution کو عددی طور پر دوبارہ پیدا کرتی ہے؛ مقالہ کم-رکاوٹ صورت میں excellent مطابقت رپورٹ کرتا ہے، جہاں اینٹروپی-driven اصطلاح غالب ہے۔ واضح عددی موازنہ اسی صورت کے لیے کیا گیا ہے۔

> **"مسئلہ وقت کا" کیا ہے، اور یہاں "entropic وقت" کیا ہے**
>
> وقت external کوئی میں (Wheeler-DeWitt) مساوات master کی ثقل کششِ کوانٹم معیاری کہ ہے یہ **کا وقت مسئلہ** نسبتی کے اس کچھ سب باقی اور دیں، بنا "گھڑی" کو مقدار طبیعی کسی اندر کے نظام ہے: تعلق ردِعمل عام ایک نہیں۔ متغیر recollapsing — ہوتیں نہیں monotonic ہمیشہ choices گھڑی قدرتی کہ ہے یہ مشکل والی آنے سامنے بار بار کریں۔ بیان لیبل سمت واحد صاف ایک تک انجام سے آغاز وہ لیے اس — ہے سکتا چلا پیچھے پھر اور آگے پہلے کو گھڑی امکانی نظام پاتی۔ دے نہیں
>
> **اینٹروپی پر مبنی وقت** Barontini کا اس مسئلے سے نمٹنے کا طریقہ ہے۔ مقام-like متغیر پڑھنے کے بجائے وہ مشاہدہ شدہ اور غیر مشاہدہ شدہ شعبے کے درمیان تبادلہ ہونے والی اینٹروپی سے گھڑی بناتے ہیں، اس طرح کہ وہ الٹی نہ ہو۔ تصوراً

یہ پرانی "thermal وقت" خیالات کے قریب ہے، لیکن یہاں اسے abstract ریاضیاتی ساخت کے بجائے قابلِ پیمائش اینٹروپی بہاؤ سے operational طور پر متعین کیا گیا ہے — اور یہی اسے حقیقی آلاتی نظام پر testable بناتا ہے۔
اہم بات یہ ہے کہ کونیاتی الفاظ — "بڑا بینگ"، "بڑا crunch"، "پیمانہ عامل"، "scalar میدان"، "چھوٹی کائنات" — **مثالی ہم شکل لیبلز** ہیں۔ یہ قید گیس of ایٹم کی ایسی خصوصیات کے نام ہیں جو سادہ کیا گیا کونیاتی ماڈلز کی مساوات سے ساختی مماثلت رکھتی ہیں۔ یہ حقیقی کائنات کے بارے میں statements نہیں۔

یہ کیا ثابت نہیں کرتا

یہاں سب سے زیادہ احتیاط ضروری ہے، کیونکہ vocabulary آسانی سے مبالغے کی طرف لے جاتی ہے۔

- **یہ مسئلہ وقت کا حل نہیں کرتا، اور اس کا دعویٰ بھی نہیں کرتا۔** مقالے کا اپنا framing یہ ہے کہ یہ "ایک کنٹرول شدہ تجرباتی ترتیب قائم کرتا ہے جس میں تعلقی-وقت constructions کو quantitatively جانچ کیا جا سکتا ہے"۔ آزمائشی نظام قضیہ نہیں ہوتا۔ کوانٹم کششِ ثقل میں تعلقی یا اینٹروپی پر مبنی وقت درست وضاحت ہے یا نہیں، یہ سوال بالکل کھلا رہتا ہے۔
- **یہ مثالی ہم شکل ہے، کائنات نہیں۔** کوئی cosmology observe نہیں کی جا رہی۔ trap میں Bose-Einstein منجمد مادہ observe کیا جا رہا ہے، اور اس کی کم کیا وضاحت سادہ کیا گیا ("minisuperspace") کونیاتی ماڈل سے ریاضیاتی طور پر مشابہ ہے۔ یہی مماثلت تجربہ کا مقصد بھی ہے اور حد بھی۔ یہاں سے یہ نتیجہ نہیں نکلتا کہ ابتدائی کائنات کا بڑا بینگ ایسا تھا، اسپیس ٹائم ایٹم سے بنا ہے، یا "وقت exists نہیں کرتا"۔
- **یہ نہیں دکھاتا کہ وقت 'اصل میں' اینٹروپی ہے۔** اینٹروپی پر مبنی گھڑی ایک constructed ordering ہے جو اس نظام میں اچھی طرح کام کرتی ہے۔ مقالہ وقت-thermal مفروضہ کے ساتھ conceptual kinship نوٹ کرتا ہے مگر یہ بھی کھلا چھوڑتا ہے کہ دونوں ایک ہی چیز ہیں یا نہیں۔ "اینٹروپی سے بنی داخلی گھڑی اس تجربہ کو ترتیب کر سکتی ہے"، "وقت اینٹروپی ہے" سے کہیں زیادہ محدود دعویٰ ہے۔
- **مؤثر مساوات ماڈلنگ نتیجہ ہے، کوانٹم میکانیات کی نئی بنیادی مساوات نہیں۔** اینٹروپی پر مبنی-وقت derived Schrodinger مساوات اینٹروپی بہاؤ سست ہو تو عام کوانٹم میکانیات کی طرف جاتی ہے، اور strictly معمول کا unitary نظریہ صرف تب بنتی ہے جب اینٹروپی بہاؤ بالکل نہ ہو۔ مقالہ اسے معیاری مساوات سے زیادہ عمومی خاص طور پر اس صورت میں قرار دیتا ہے جب مشاہدہ شدہ نظام thermodynamically غیر مشاہدہ شدہ نظام کے لیے کھلا ہو — یہ اس قسم کے setup میں کھلا subsystems کے بارے میں statement ہے، fundamental طبیعیات کو اسی طرح دوبارہ لکھنے کا دعویٰ نہیں۔
- **یہ ایک تجربہ، ایک مصنف اور ایک گھڑی choice ہے۔** نتائج میں تقریباً 5% فی-نقطہ شماریاتی غیر یقینی ہے اور میدان-اور کثافت-averaged approximations استعمال ہوتی ہیں۔ منتخب گھڑی اور کم باریک-graining deliberate ماڈلنگ فیصلے ہیں؛ ساختی نتائج سے پہلے دوسرے گروہ انہیں آزمانا چاہیں گے۔

شواہد کتنی مضبوط ہے

جو محدود بات مقالہ حقیقت میں دعویٰ کرتا ہے، اس کے لیے شواہد صاف ہے۔ متعلق timescale پر نظام واقعی اچھی طرح isolated ہے، اینٹروپی حسابی زبان قریب ہوتی ہے (کل اینٹروپی غلطی کے اندر مستقل)، داخلی گھڑی اعداد و شمار کو تقریباً ہر جگہ monotonically ترتیب کرتی ہے، اور اسی ماڈل سے مصنف کی derived مؤثر مساوات، اعداد و شمار سے inferred پیرامیٹرز کے

ساتھ، کم-رکاوٹ صورت میں ناپی گئی حرکیات دوبارہ پیدا کرتی ہے۔ اعداد و شمار openly دستیاب ہیں۔ یہ حقیقی، controllable نظام کی حقیقی پیمائش ہے، thought تجربہ نہیں۔

لیکن اس شواہد پر جتنا وزن رکھا جا سکتا ہے وہ بھی اتنا ہی محدود ہے۔ سب کچھ کم کیا منجمد مادہ ماڈل اور minisuperspace cosmology کی تشبیہ پر کھڑا ہے، اور analogies روشنی ڈالتی ہیں، ثابت نہیں کرتیں۔ ایک platform، ایک مصنف اور ایک داخلی-وقت نسخہ کا کام کرنا مضبوط of proof اصول ہے مگر نیچر میں وقت کے رویہ کے بارے میں بڑے دعوے کی کمزور بنیاد۔ درست reading یہ ہے: اب یہ طریقہ تجربہ گاہ میں کیا جا سکتا ہے، اور check کیا جا سکتا ہے۔

یہ کیوں اہم ہے

مسئلہ وقت کا پر بحث طویل عرصے سے ریاضیاتی قالب کی سطح پر پھنسی ہوئی ہے، جہاں مختلف proposals کو falsfiy کرنا مشکل ہے کیونکہ وہ کم واضح، قابلِ پیمائش پیش گوئیاں دیتی ہیں۔ اس بحث کے ایک چھوٹے حصے کو بھی runnable تجربہ میں بدل دینا — جہاں داخلی گھڑی یا تو اعداد و شمار ترتیب کرتی ہے یا نہیں، مؤثر مساوات مطابق کرتی ہے یا نہیں — بحث کی نوعیت بدل دیتا ہے۔ theorists کو اپنی machinery جانچ کرنے کے لیے bench مل جاتی ہے۔

حقیقی کردار یہی ہے: وقت کا جواب نہیں، بلکہ **سوال کو quantitative طور پر پوچھنے کی جگہ**۔ Cold-ایٹم platforms پہلے ہی Hawking تابکاری، expanding کائناتیں اور false-vacuum decay کے controllable analogs بن چکے ہیں؛ یہ تعلقی وقت اور arrow وقت کا کو بھی toolbox میں شامل کرتا ہے۔ اہمیت ان پیروی-ups میں ہے جنہیں یہ ممکن کرتا ہے — مختلف گھڑی choices، bouncing بمقابلہ singular رویہ، reversibility کے جانچیں — جن میں ہر چیز اب صرف حساب نہیں، پیمائش بھی ہو سکتی ہے۔

صاف خلاصہ

ایک طبیعیات دان نے Bose–Einstein condensate بنایا، اسے باریک بصری رکاوٹ کے ذریعے مشاہدہ شدہ اور غیر مشاہدہ شدہ حصوں میں تقسیم کیا، اور دونوں کے درمیان بہنے والی اینٹروپی سے ایک اندرونی "اینٹروپی پر مبنی وقت" بنایا۔ یہ گھڑی مشاہدہ شدہ نصف کے پھیلنے اور دوبارہ سکڑنے کے چکر کو ترتیب دیتی ہے، اینٹروپی کا تبادلہ ہو تو تیز چلتی ہے اور تبادلہ رک جائے تو رک جاتی ہے۔

بلا مبالغہ جائزہ

مقالے کیا دکھاتا ہے: ایک اچھی طرح isolated cold-ایٹم نظام میں اینٹروپی تبادلہ سے متعین کی گئی داخلی گھڑی مشاہدہ شدہ حرکیات کو monotonically ترتیب کر سکتی ہے، اور مؤثر "اینٹروپی پر مبنی-وقت" مساوات آزمائے گئے کم-رکاوٹ صورت میں ناپی گئی evolution دوبارہ پیدا کرتی ہے۔

کیا قرینِ قیاس ہے مگر دکھایا نہیں گیا: یہ کہ اینٹروپی پر مبنی یا تعلقی وقت حقیقی کوانٹم کششِ ثقل میں وقت کی اچھی وضاحت ہے۔ تجربہ ان constructions کو سنجیدگی سے لینے کے مطابق ہے؛ نیچر کے لیے انہیں تصدیق کرنا نہیں کرتا۔

یہ کیا نہیں دکھاتا: مسئلہ وقت کا حل ہو گیا، کوانٹم کششِ ثقل حل ہو گئی، کائنات نے اسی طرح بڑا بینگ سے آغاز کیا، اسپیس

ٹائم ایٹم سے emerge ہوتا ہے، یا "وقت exists نہیں کرتا"۔

اہم حدود: ایک platform، ایک مصنف اور ایک گھڑی choice، تقریباً 5% فی-نقطہ غیر یقینی؛ میدان-mean اور کثافت-averaged approximations؛ اور سب سے بڑھ کر قید منجمد مادہ اور سادہ کیا گیا کونیاتی ماڈل کے درمیان تشبیہ پر انحصار۔

عام قاری کو کتنا اعتماد رکھنا چاہیے؟ اس بات پر زیادہ کہ تجربہ نے اپنے نظام میں وہی کیا جو رپورٹ کیا گیا ہے۔ اس مثالی ہم شکل سے حقیقی کائنات میں وقت کے بارے میں کسی بڑے دعویٰ تک چھلانگ پر کم اعتماد۔

ماخذ

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