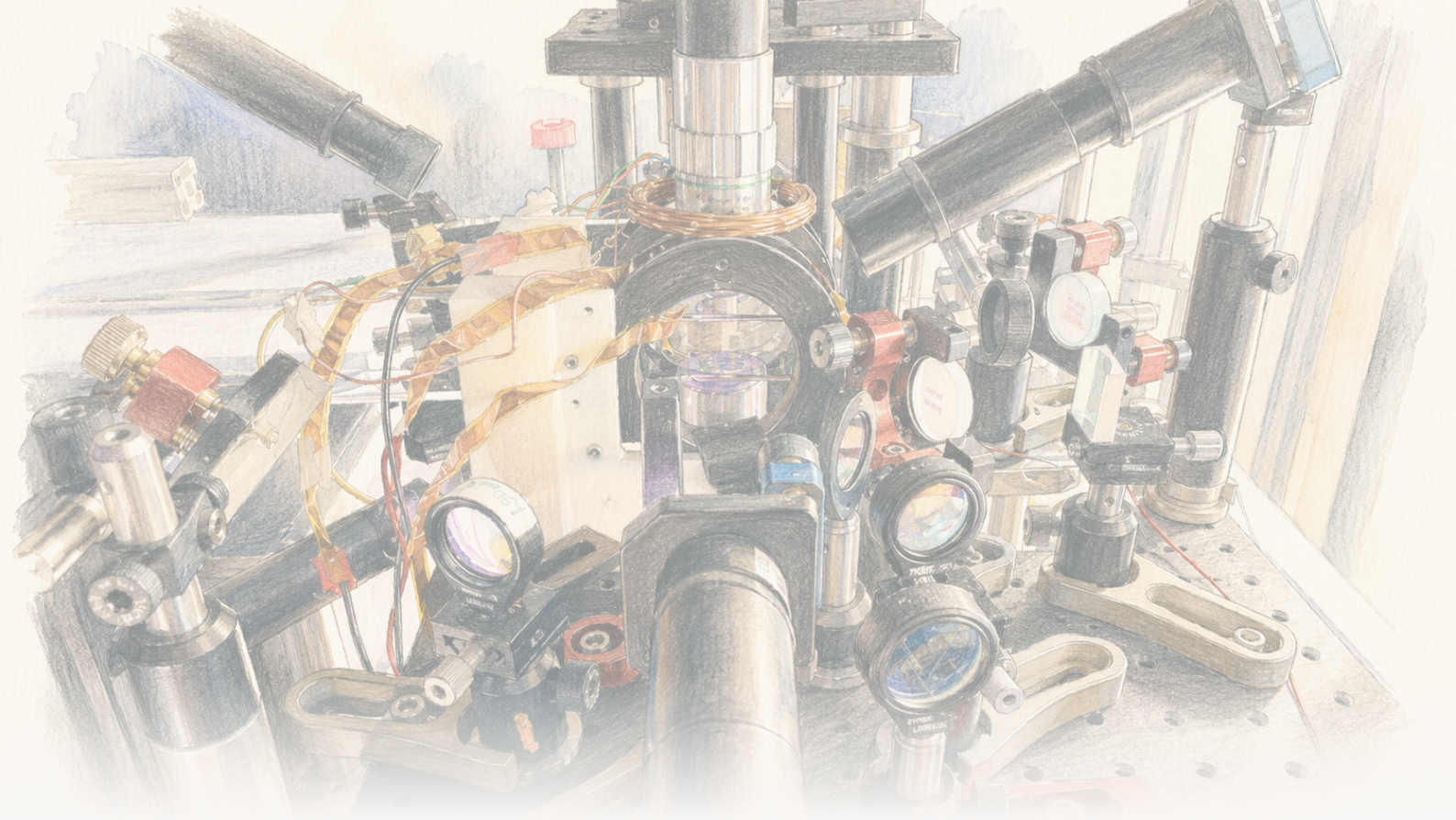

The Clean Paper

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

Cold-atom পরীক্ষা quantum মহাকর্ষ-র “problem of time” পরীক্ষা করছে—পরীক্ষাগার analog হিসেবে, সমাধান হিসেবে নয়

Canonical quantum মহাকর্ষ-তে Wheeler-DeWitt equation-এর ভেতরে ঘটনাকে ধারাবাহিকভাবে সাজানোর কোনো বাইরের ঘড়ি নেই—এটাই “problem of time”। একক লেখকের একটি পরীক্ষা Bose-Einstein condensate-কে পাতলা optical barrier দিয়ে observed ও unobserved sector-এ ভাগ করে, তারপর তাদের মধ্যে এন্ট্রপি প্রবাহ থেকে internal ঘড়ি তৈরি করছে। সেই “entropic time” observed sector-এর প্রসারণ ও recollapse সাজায়, এবং পরীক্ষিত low-barrier case-এ একটি effective equation পরিমাপ করা data পুনরুৎপাদন করে। এটি relational-time ধারণার নিয়ন্ত্রিত পরীক্ষার ক্ষেত্রে: “big bang”, “big crunch” ও “miniuniverse” trapped gas-এর analog label, বাস্তব cosmology নয়; কাজটি problem of time বা quantum মহাকর্ষ সমাধানের দাবি করে না।

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

একটি ফাঁদরে ভতের, এনট্রপি দিয়িে বানানো ঘড়ি

প্রচলতি কোয়ান্টাম মহাকর্ষ-তে একটি অদ্ভুত এবং দীর্ঘদনিরে ধাঁধা আছে: কন্দেরীয় সমীকরণটতিে সময়ই নইে। Wheeler-DeWitt সমীকরণ, পুরো মহাবশ্বিরে জন্য Schrodinger সমীকরণ-এর সবচয়েে কাছাকাছি ধারণা, সহজভাবে বলে যে একটি নর্দিষ্টি অপারটের অবস্থার ওপর কাজ করলে ফল শূন্য। বাইরে থকেে টকিটকি করা কোনো প্যারামটিার নইে, "আগে" ও "পরে" সাজানোর কছিু নইে — অথচ আমরা স্পষ্টভাবইে সময়রে প্রবাহ অনুভব করি। এটইি **সমস্যা of সময়**, এবং অর্ধশতাব্দীরও বশেি সময় ধরে এর সমাধান মলেনেি।

ভৌত পর্যালোচনা গবষেণা-এ একক লখেকরে এই গবষেণাপত্র সমস্যাটরি সমাধান দয়ে না। কাজটি তুলনায় শান্ত, এবং নজিরে সীমার মধ্যে বশেি ব্যবহারযোগ্য: এটি ছোট, ভালোভাবে নয়িন্ত্রতি একটি পরীক্ষাগার ব্যবস্থা তরৈি করে, যখোনে প্রস্তাবতি সমাধানরে একটি পরবিারকে **বাস্তব তথ্যরে সঙ্গে পরীক্ষা করা যায়**। বশ্বিবদ্যিালয় of Birmingham-এর Giovanni Barontini একটি Bose-Einstein ঘনীভূত পদার্থ — একটমিাত্র কোয়ান্টাম বস্তুর মতো আচরণ করা অতশীতল পরমাণুর মঘে — ব্যবহার করে এমন একটি অনুরূপ তরৈি করছেনে, যখোনে "অভ্যন্তরীণ", সম্পর্কভত্তিকি সময় নয়িে শুধু তর্ক নয়, পরমিাপও করা যায়। কৌশলটি হলো বাইররে স্টপওয়াচ থকেে নয়, ব্যবস্থার ভতেরইে যভোবে এনট্রপি আদান-প্রদান হয়, তা দয়িে একটি ঘড়ি বানানো।

"সমস্যা of সময়রে নয়িন্ত্রতি অনুরূপ" আর "পদার্থবদিরো সময়রে রহস্য সমাধান করছেনে" — এই দুটরি দূরত্বই এখানে আসল গল্প, এবং সইে দূরত্ব অনকে।

গবষেক কী করছেনে

যন্ত্রটতিে প্রায় **24,000 rubidium-87 atom**-এর একটি Bose–Einstein condensate-কে একটি সংরক্ষণশীল optical dipole trap-এ ধরে দোলানো হয়—পুরো atom cloud ফাঁদরে এক পাশ থকেে আরকে পাশে দুলতে থাকে। প্রায় **8 micrometre** চওড়া একটি **পাতলা optical barrier**, digital micromirror device দয়িে 675 nm আলোতে আঁকা, ফাঁদটকিে দুই ভাগে ভাগ করে। এক ভাগ পর্যবক্ষেণ করা হয় ("**উজ্জ্বল খাত**"), অন্যটি নয় ("**অন্ধকার খাত**")। পরীক্ষার প্রায় 100-millisecond সময়সীমায় পরমিাপযোগ্য particle loss বা dissipation দখো যায়নি। তাই ভালো আনুমানকিতায় এটি একটি closed system, যার Hamiltonian নজিে সময়রে ওপর নর্ভির করে না।

[figure_pair pending]

বাঁ দকিে, কাচরে কোষরে ভতের magneto-আলোকীয় trap ঠান্ডা rubidium পরমাণুর মঘে তরৈি করছে — ঘনীভূত পদার্থ প্রস্তুতরি পথে প্রাথমকি cooling পর্যায়। ডান দকিে আলোকীয় যন্ত্রপাতরি পাশে Giovanni Barontini। এগুলো পরীক্ষার পরীক্ষাগার ব্যবস্থার ছবি, কোনো বাস্তব ক্ষুদ্র মহাবশ্বিরে ছবি নয়।

সাধারণ পরীক্ষাগার ঘড়ি দয়িে দখেলে — প্রতি 2 ms-এ একটি শোষণ ছবি — উজ্জ্বল খাত একটি আকর্ষণীয় আচরণ করে। পরমাণু বাধা পরেয়িে আসে, খাত শূন্য থকেে বড় হতে শুরু করে (Barontini এই মুহূর্তকে "**বড় বস্ফিোরণ**" বলছেনে), সর্বোচ্চ বস্তিারে পৌঁছায়, তারপর সংকুচতি হয়ে আবার ডার্ক দকিে খালি হয়ে যায় ("**বড় crunch**")। বাধা কত উঁচু তার ওপর নর্ভির করে এই চক্র বারবার হতে পারে।

এরপর আসে আসল প্রশ্ন। পরীক্ষাগাররে ঘড়টিি ব্যবস্থার *বাইরে*—ঠকি সইে ধরনরে বাহ্যকি সময়, যা Wheeler–DeWitt কাঠামোতে সমস্যাজনক। তাই Barontini জানতে চান: উজ্জ্বল অংশটরি ইতহিাস কি **শুধু ব্যবস্থার ভতেররে পরমিাপ ব্যবহার করে সাজানো যায়**? তাঁর উত্তর হলো **entropic time** নামে একটি অভ্যন্তরীণ ঘড়ি, যা একই ছবগিুলো থকেে তনি ধাপে তরৈি করা যায়। প্রথমে প্রতটিি absorption image থকেে উজ্জ্বল অংশরে চারটি রাশি বরি করা হয়: atom number, density profile-এর center of mass, width এবং entropy। তারপর atom-গুলো barrier পার হলে entropy কীভাবে বদলায় তা দখো হয়। শষেে পরমিাপ করা center-of-mass পথ বরাবর entropy gradient-এর পরবির্তনরে *মাত্রা* যোগ করে ঘড়ি এগোয়—দকিটি নয়। ফলে cloud দকি পাল্টালওে internal clock সামনে এগোতে পারে। তথ্যরে বশেরি ভাগ অংশে "big bang" থকেে "big crunch" পর্যন্ত একমুখী ক্রম পাওয়া যায়; কবেল coarse sampling-এর কারণে কয়কেটি ছোট বচ্যিুতি আছে।

শেষে তিনি একটি কার্যকর **"এন্ট্রপিজিনতি-সময় Schrodinger সমীকরণ"** বের করেন — বাইরের সময়ের বদলে এই অভ্যন্তরীণ ঘড়ি দিয়ে উজ্জ্বল খাতের বিবর্তন লেখা একটি সমীকরণ — এবং সংখ্যাগত সমাধান করে দেখেন, ক্যামেরা যা রেকর্ড করছে তা এটি পুনরুৎপাদন করতে পারে কি না।

কী পাওয়া গেছে

ক্রমে বেশি উচ্চাকাঙ্ক্ষী তিনটি ফল।

- **অভ্যন্তরীণ ঘড়িটি ক্রম হিসেবে কাজ করে।** এন্ট্রপিজিনতি সময় প্রায় সর্বত্র একমুখে বাড়ে, এবং তার গতি নির্ধারিত হয় এন্ট্রপি কত দ্রুত বাধা পার হচ্ছে তা দিয়ে: এন্ট্রপি বিনিময় বেশি হলে ঘড়ি দ্রুত চলে, আর **কোনো এন্ট্রপি বিনিময় না হলে পুরোপুরি থেমে যায়।** Reversible, কম-বাধা পরিসরে একটি বড় crunch এবং পরের বড় বিস্ফোরণের মাঝখানে *একটুও অভ্যন্তরীণ সময় পেরোয় না* — কারণ তখন এন্ট্রপি বিনিময় নেই — যদিও পরীক্ষাগার ঘড়ি চলতে থাকে। পুরো ডটোসটে জুড়ে দুই খাতের মোট এন্ট্রপি ত্রুটি দণ্ডের মধ্যে স্থির ছিল, বন্ধ ব্যবস্থার জন্য যেমন হওয়ার কথা।
- **ভিন্ন পরিসরে ভিন্ন "সময়" পাওয়া যায়।** বাধা উঁচু করলে এন্ট্রপি বিনিময় কমে, ফলে অভ্যন্তরীণ ঘড়ি ধীর হয়। দুই খাত প্রায় বিচ্ছিন্ন হয়ে যাওয়ার পর্যায়ে উজ্জ্বল খাত গবেষণাপত্রের ভাষায় একটি **"তাপ মৃত্যু"**-এর দিকে যায়: স্থির অবস্থা, যেখানে এন্ট্রপিজিনতি সময় একেবারেই থেমে যায়।
- **একটি কার্যকর সমীকরণ তথ্য পুনরুৎপাদন করে।** পরীক্ষামূলক প্যারামিটার দিয়ে এন্ট্রপিজিনতি-সময় Schrodinger সমীকরণ সংখ্যাগতভাবে সমাধান করলে মেঘের প্রস্থের মাপা বিবর্তন পুনরুদ্ধার করা যায়। গবেষণাপত্রে কম-বাধা কেসের জন্য চমৎকার সামঞ্জস্য জানানো হয়েছে, যেখানে এন্ট্রপি-চালিত পরিভাষা প্রাধান্য পায়; স্পষ্ট সংখ্যাগত তুলনা-টিও ওই কেসের জন্যই করা হয়েছে।

> **"সময়ের সমস্যা" কী, আর এখানে "এন্ট্রপিজিনতি সময়" বলতে কী বোঝায়**
>
> **সমস্যা of সময়** হলো প্রচলিত কোয়ান্টাম মহাকর্ষের master সমীকরণ (Wheeler-DeWitt)-এ বাইরের কোনো সময় চলক না থাকা। একটি সাধারণ প্রতিক্রিয়া হলো *সম্পর্কভিত্তিক* পদ্ধতি: ব্যবস্থার ভেতরের কোনো ভৌত পরিমাণকে "ঘড়ি" হিসেবে বেছে নেওয়া এবং বাকি সবকিছুকে তার তুলনায় বর্ণনা করা। বারবার দেখা দেওয়া একটি সমস্যা হলো, স্বাভাবিক ঘড়ি পছন্দ সবসময় একমুখী নয় — আবার সংকুচিত হওয়া কোনো ব্যবস্থায় প্রার্থী ঘড়ি সামনে গিয়ে পরে পিছিয়েও যেতে পারে — তাই শুরু থেকে শেষ পর্যন্ত একক দিকি স্পষ্টভাবে লেবেলে করা যায় না।
> **এন্ট্রপিজিনতি সময়** হলো Barontini-র এই সমস্যাকে পাশ কাটানোর উপায়। অবস্থানের মতো চলক পড়ার বদলে তিনি পর্যবেক্ষিত এবং অপর্যবেক্ষিত খাতের মধ্যে আদান-প্রদান হওয়া *এন্ট্রপি* দিয়ে ঘড়ি বানান, এমনভাবে যাতে সেটি উল্টো দিকে না চলে। ধারণাগতভাবে এটি আগের "তাপীয় সময়" ভাবনার কাছাকাছি, কিন্তু এখানে ঘড়ি-টি বিমূর্ত গাণিতিক গঠন নয়, পরিমাপযোগ্য এন্ট্রপি প্রবাহ থেকে কার্যগতভাবে সংজ্ঞায়িত — আর সেটিই বাস্তব যন্ত্রপাতিতে পরীক্ষা করা সম্ভব করে।
> সবচেয়ে গুরুত্বপূর্ণ, মহাজাগতিক শব্দগুলো — "বড় বিস্ফোরণ", "বড় crunch", "মাত্রা কারণ", "স্কেলের ক্ষেত্রে", "miniuniverse" — **অনুরূপ লেবেলে।** এগুলো আবদ্ধ পরমাণবিক গ্যাসের এমন বৈশিষ্ট্যের নাম, যেগুলো সরলীকৃত মহাজাগতিক মডেলের সমীকরণের সঙ্গে *গাঠনিকভাবে সাদৃশ্যপূর্ণ*। এগুলো বাস্তব মহাবিশ্বে সম্পর্কে কোনো বক্তব্য নয়।

এই গবেষণা কী প্রমাণ করে না

এখানেই সবচেয়ে বেশি সতর্ক হওয়া দরকার, কারণ ব্যবহৃত শব্দগুলো সহজেই বাড়াবাড়ি ব্যাখ্যা ডেকে আনতে পারে।

- **এটি সমস্যা of সময় সমাধান করে না, এবং এমন দাবিও করে না।** গবেষণাপত্রের নিজস্ব উপস্থাপনভঙ্গি হলো, এটি "এমন একটি

নিয়ন্ত্রিত পরীক্ষামূলক বিন্যাস প্রতিষ্ঠা করে যেখানে সম্পর্কভিত্তিক-সময় নির্মাণকে পরিমাণগতভাবে পরীক্ষা করা যায়।” Testbed কোনো উপাদান নয়। কোয়ান্টাম মহাকর্ষ-তে সম্পর্কভিত্তিক বা এন্ট্রপিজনিত সময়-ই সময়ের *সঠিক* ব্যাখ্যা কিনা, সেই প্রশ্ন আগের মতোই খোলা।

- **এটি অনুরূপ, মহাবিশ্ব নয়।** এখানে মহাজাগতিকতত্ত্ব পর্যবেক্ষণ করা হচ্ছে না। ফাঁদে রাখা Bose-Einstein ঘনীভূত পদার্থ পর্যবেক্ষণ করা হচ্ছে, যার হ্রাসপ্রাপ্ত বর্ণনা একটি সরলীকৃত (“minisuperspace”) মহাজাগতিক মডেলের সঙ্গে *গাণিতিকভাবে সাদৃশ্যপূর্ণ*। এই সাদৃশ্যই পরীক্ষার মূল কথা, আবার সীমাও। এখান থেকে বোঝা যায় না যে প্রাথমিক মহাবিশ্বে এমন বড় বিস্ফোরণ হয়েছিল, স্থানকাল পরমাণু দিয়ে তৈরি, বা “সময়ের অস্তিত্ব নেই”।
- **এটি দেখায় না যে সময় আসলে এন্ট্রপি।** এন্ট্রপিজনিত ঘড়ি হলো একটি নির্মিত ক্রম, যা এই ব্যবস্থায় ভালো কাজ করে। গবেষণাপত্র তাপীয়-সময় অনুমানের সঙ্গে ধারণাগত আত্মীয়তার কথা বলে, কিন্তু দুটো আদৌ একই কিনা সেটিও খোলা রাখে। “এন্ট্রপি দিয়ে বানানো একটি অভ্যন্তরীণ ঘড়ি এই পরীক্ষাকে সাজাতে পারে” — এই দাবি “সময় হলো এন্ট্রপি”-র চেয়ে অনেক সংকীর্ণ।
- **কার্যকর সমীকরণটি মডেলিং ফল, কোয়ান্টাম বলবিদ্যা নতুন করে লেখা নয়।** এন্ট্রপিজনিত-সময় Schrodinger সমীকরণ এন্ট্রপি প্রবাহ ধীর হলে সাধারণ কোয়ান্টাম বলবিদ্যার দিকে নেমে আসে, আর এন্ট্রপি প্রবাহ একেবারেই না থাকলে তবেই কঠোর অর্থে প্রচলিত unitary তত্ত্ব হয়। গবেষণাপত্রটি একে মানক সমীকরণের চেয়ে বেশি সাধারণ হিসেবে অবস্থান দেয় *বিশেষ করে যখন পর্যবেক্ষিত ব্যবস্থা thermodynamically অপর্যবেক্ষিত ব্যবস্থার জন্য উন্মুক্ত* — এটি এই ধরনের বিন্যাসের উন্মুক্ত উপব্যবস্থা সম্পর্কে বক্তব্য, মৌলিক পদার্থবিদ্যা অবশ্যই এভাবে লিখিত হবে এমন দাবি নয়।
- **এটি একটি পরীক্ষা, একজন লেখক, একটি ঘড়ি পিছনদ।** প্রতিটি তথ্যবিন্দুতে প্রায় 5% পরিসংখ্যানগত অনিশ্চয়তা আছে, এবং বিশ্লেষণ গড়-ক্ষেত্রের ও averaged-ঘনত্ব আসন্নীকরণের ওপর নির্ভর করে। বেছে নেওয়া ঘড়ি এবং coarse-graining ইচ্ছাকৃত মডেলিং সিদ্ধান্ত; গাঠনিক সিদ্ধান্তে যাওয়ার আগে অন্য দল এগুলো পরীক্ষা করতে চাইবে।

প্রমাণ কতটা শক্তিশালী

গবেষণাপত্র যে সীমিত দাবি আসলে করে, তার জন্য প্রমাণ পরিষ্কার। প্রাসঙ্গিক সময়সীমায় ব্যবস্থা সত্যিই ভালোভাবে বিচ্ছিন্ন, এন্ট্রপি হিসাব মেলে (ত্রুটি দণ্ডের মধ্যে মোট এন্ট্রপি স্থির), অভ্যন্তরীণ ঘড়ি প্রায় সর্বত্র তথ্যকে একমুখে সাজায়, এবং একই মডেল থেকে লেখকের বের করা, তথ্য থেকে অনুমিতি প্যারামিটার-সহ কার্যকর সমীকরণ কম-বাধা কেসে মাপা গতিবিদ্যা পুনরুৎপাদন করে। তথ্য উন্মুক্ত। এটি বাস্তব, নিয়ন্ত্রণযোগ্য ব্যবস্থার বাস্তব পরিমাপ; thought পরীক্ষা নয়।

কিন্তু এটি যে ভার বহন করতে পারে, সেটিও সেই অনুযায়ী সীমিত। সবকিছু হ্রাসপ্রাপ্ত ঘনীভূত পদার্থ মডেল এবং minisuperspace মহাজাগতিকতত্ত্বের উপমার ওপর দাঁড়ানো, আর উপমা আলো দেখাতে পারে, প্রমাণ করতে পারে না। একটি প্ল্যাটফর্মে একজন লেখক দেখালেন একটি অভ্যন্তরীণ-সময় পদ্ধতি কাজ করে — প্রমাণ of নীতি হিসেবে এটি শক্তিশালী, কিন্তু প্রকৃতিতে সময় কীভাবে আচরণ করে সে দাবি করার ভিত্তি হিসেবে দুর্বল। সঠিক পাঠ হলো: পদ্ধতিটি এখন পরীক্ষাগার-তে *করা* যায়, এবং পরীক্ষা করা যায়।

কেন এটি গুরুত্বপূর্ণ

সমস্যা of সময় নিয়ে আলোচনা দীর্ঘদিন ফরমালিজমের স্তরেই আটকে আছে। প্রতিদ্বন্দ্বী প্রস্তাবগুলোকে খণ্ডন করা কঠিন, কারণ সেগুলো খুব কম নির্দিষ্ট, পরিমাপযোগ্য পূর্বাভাস দেয়। সেই বিতর্কের অন্তত একটি অংশকে এমন পরীক্ষায় রূপান্তর করা, যেখানে অভ্যন্তরীণ ঘড়ি হয় তথ্যকে সাজায়, নয় সাজায় না; কার্যকর সমীকরণ হয় মানানসই করে, নয় করে না — যুক্তির প্রকৃতিই বদলে দেয়। Theorist-দের নিজেদের আনুষ্ঠানিক যন্ত্রপাতি পরীক্ষা করার একটি bench দেয়।

এটাই আসল অবদান: সময়ের সমস্যার উত্তর নয়, বরং **প্রশ্নটিকে পরিমাণগতভাবে পরীক্ষা করার একটি জায়গা।** Cold-atom platform আগে Hawking radiation, expanding universe এবং false-vacuum decay-এর নিয়ন্ত্রণযোগ্য analogue হিসেবে ব্যবহৃত হয়েছে; এখন

সেই toolbox-এ relational time এবং time arrow-ও যোগ হলো। মূল্য ভবিষ্যৎ পরীক্ষায়—ভিন্ন clock choice, bouncing বনাম singular behaviour, reversibility test—যেগুলো এখন শুধু সমীকরণ নয়, পরিমাপের বিষয়ও হতে পারে।

পরিষ্কার সারাংশ

একজন পদার্থবিদ Bose–Einstein condensate তৈরি করে একটি পাতলা optical barrier দিয়ে তাকে পর্যবেক্ষিত ও অপর্যবেক্ষিত দুই ভাগে ভাগ করেন, এবং দুই ভাগের মধ্যে প্রবাহিত entropy থেকে একটি অভ্যন্তরীণ “entropic time” বানান। এই clock পর্যবেক্ষিত অংশের expansion ও recollapse-এর চক্র সাজায়: entropy exchange হলে দ্রুত এগোয়, না হলে থেমে যায়। লেখক যে কম-barrier case পরীক্ষা করেছেন, সেখানে এই অভ্যন্তরীণ সময়ে লেখা effective equation মাপা তথ্যের সঙ্গে ভালোভাবে মেলে। এটি মহাবিশ্বের জন্য চূড়ান্ত সমাধান নয়; বরং problem of time পরীক্ষা করার জন্য একটি ক্ষুদ্র, নিয়ন্ত্রণযোগ্য laboratory testbed।

সোজাসাপটা যাচাই

গবেষণাপত্র যা দেখায়: ভালোভাবে বিচ্ছিন্ন একটি ঠান্ডা-পরমাণু ব্যবস্থায় এনট্রপি বিনিময় দিয়ে সংজ্ঞায়িত অভ্যন্তরীণ ঘড়ি পর্যবেক্ষিত গতিবিদ্যাকে প্রায় একমুখে সাজাতে পারে, এবং পরীক্ষিত কম-বাধা কেসে কার্যকর “এনট্রপিজনিত-সময়” সমীকরণ মাপা বিবর্তন পুনরুৎপাদন করে।

যা সম্ভবপর, কিন্তু দেখানো হয়নি: বাস্তব কোয়ান্টাম মহাকর্ষ-তে এনট্রপিজনিত বা সম্পর্কভিত্তিক সময় সময়ের ভালো ব্যাখ্যা। পরীক্ষা এমন নির্মাণকে গুরুত্ব দিয়ে দেখো যুক্তিযুক্ত করে; প্রকৃতির জন্য সেগুলো নিশ্চিত করে না।

যা এটি দেখায় না: “সময়ের সমস্যা” সমাধান হয়ে গেছে, quantum gravity সমাধান হয়েছে, মহাবিশ্ব সত্যিই এমন একটি big bang থেকে শুরু হয়েছে, spacetime atom থেকে উদ্ভূত, অথবা “সময়ের অস্তিত্ব নেই”—এর কোনোটিই এই পরীক্ষার ফল নয়।

প্রধান সীমাবদ্ধতা: একটি প্ল্যাটফর্ম, একজন লেখক এবং একটি ঘড়ি পছন্দ; তথ্যবিন্দু-পিছু প্রায় 5% অনিশ্চয়তা; গড়-ক্ষেত্রের ও averaged-ঘনত্ব আসন্নীকরণ; এবং সর্বোপরি আবদ্ধ ঘনীভূত পদার্থ ও সরল মহাজাগতিক মডেলের উপমার ওপর নির্ভরতা।

সাধারণ পাঠকের কতটা আস্থা রাখা উচিত? নিজের ব্যবস্থায় পরীক্ষা যা রিপোর্ট করে, তা করছে — এ বিষয়ে উচ্চ আস্থা। এই অনুরূপ থেকে বাস্তব মহাবিশ্বের সময় সম্পর্কে বড় দাবি করার ক্ষেত্রে আস্থা কম।

উৎস

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