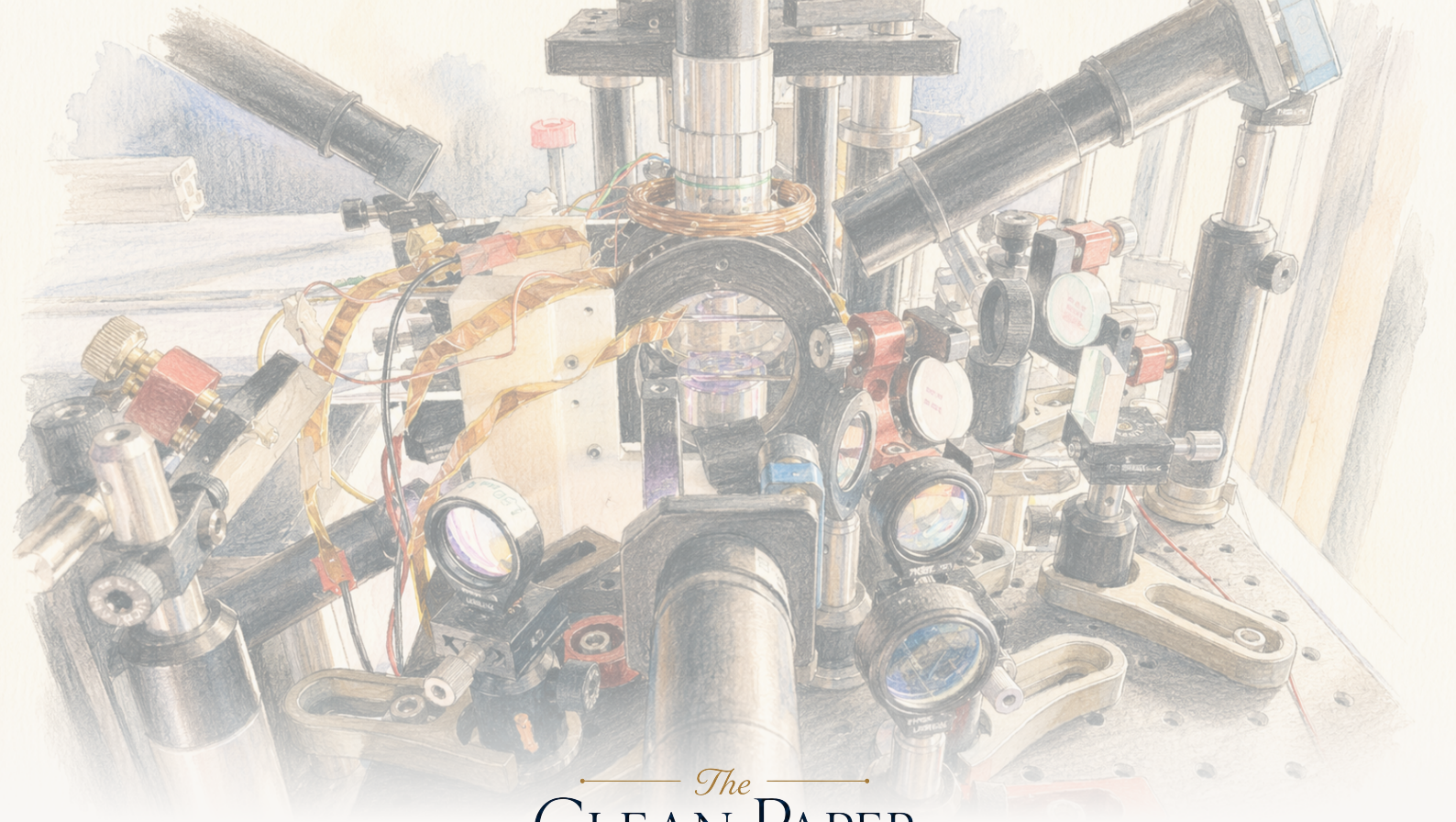

The
CLEAN PAPER

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

Eksperimen atom dingin menguji 'problem of time' dalam gravitasi kuantum — sebagai analog laboratorium, bukan jawaban

Dalam gravitasi kuantum kanonik, persamaan Wheeler-DeWitt tidak memiliki jam eksternal untuk mengurutkan peristiwa: inilah 'problem of time'. Sebuah eksperimen dengan penulis tunggal mengisolasi kondensat Bose-Einstein, membaginya dengan penghalang optik tipis menjadi sektor yang tidak diamati dan yang diamati, lalu membangun jam internal dari entropi yang mengalir di antara keduanya. 'Waktu entropik' itu mengurutkan ekspansi dan kolaps sektor yang diamati, dan sebuah persamaan efektif mereproduksi data terukur dalam kasus penghalang rendah yang diperiksa. Ini adalah testbed terkendali bagi gagasan waktu relasional: 'big bang', 'big crunch', dan 'miniuniverse' adalah label analog untuk gas terperangkap, bukan kosmologi nyata, dan pekerjaan ini tidak mengklaim menyelesaikan problem of time atau gravitasi kuantum.

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

Sebuah jam yang dibangun dari entropi, di dalam perangkap

Dalam gravitasi kuantum kanonik ada teka-teki yang aneh dan keras kepala: persamaan utamanya tidak memiliki waktu di dalamnya. Persamaan Wheeler-DeWitt, hal yang paling mendekati persamaan Schrodinger untuk seluruh alam semesta, pada dasarnya hanya menyatakan bahwa suatu operator yang bekerja pada keadaan menghasilkan nol. Tidak ada parameter eksternal yang berdetak, tidak ada sesuatu yang mengurutkan "sebelum" dan "sesudah" — padahal kita jelas mengalami berlalunya waktu. Inilah **problem of time**, dan masalah ini telah menolak penyelesaian selama lebih dari setengah abad.

Sebuah makalah dengan penulis tunggal di *Physical Review Research* tidak menyelesaikannya. Yang dilakukan makalah itu lebih tenang dan, dengan caranya sendiri, lebih berguna: membangun sebuah sistem laboratorium kecil yang terkendali dengan baik, tempat satu keluarga jawaban yang pernah diusulkan dapat **diuji terhadap data nyata**. Giovanni Barontini dari University of Birmingham mengambil sebuah kondensat Bose-Einstein — awan atom ultradingin yang berperilaku sebagai satu objek kuantum — lalu mengubahnya menjadi analog tempat gagasan waktu "internal" dan relasional dapat diukur, bukan sekadar diperdebatkan. Triknya adalah membangun jam bukan dari stopwatch di luar sistem, melainkan dari entropi yang dipindah-pindahkan sistem di dalam dirinya sendiri.

Jarak antara "analog terkendali dari problem of time" dan "fisikawan telah memecahkan waktu" adalah inti keseluruhan cerita ini, dan jaraknya sangat jauh.

Apa yang dilakukan peneliti

Perangkatnya adalah kondensat berisi sekitar **24.000 atom rubidium-87** yang ditahan di dalam perangkap dipol optik konservatif dan dibuat berosilasi — seluruh awan atom bergerak bolak-balik di sepanjang perangkap. Sebuah **penghalang optik tipis** — lebarnya kira-kira 8 mikron, dibuat dengan cahaya 675 nm menggunakan perangkat micromirror digital — membagi perangkap menjadi dua bagian. Satu bagian diamati ("**sektor terang**"); bagian lainnya tidak ("**sektor gelap**"). Selama jendela eksperimen sekitar 100 milidetik, sistem tidak menunjukkan kehilangan partikel atau disipasi yang dapat diukur, sehingga dengan pendekatan yang baik ia merupakan sistem tertutup dengan Hamiltonian yang tidak bergantung pada waktu.

[figure_pair pending]

Di kiri, perangkap magneto-optik menghasilkan awan dingin atom rubidium di dalam sel kaca: salah satu tahap pendinginan awal menuju persiapan kondensat. Di kanan, Giovanni Barontini berdiri di samping perangkat optik. Ini adalah foto sistem laboratorium di balik eksperimen, bukan citra alam semesta mini yang harfiah.

Jika diamati dengan jam laboratorium biasa — satu citra absorpsi setiap 2 ms — sektor terang melakukan sesuatu yang menggugah imajinasi. Atom mengalir melewati penghalang dan sektor itu tumbuh dari nol (Barontini menyebut momen ini "**big bang**"), mencapai ukuran maksimum, lalu menyusut dan kosong kembali ke sisi gelap ("**big crunch**"). Bergantung pada tinggi penghalang, siklus ini dapat berulang.

Lalu tibalah poin sebenarnya. Jam laboratorium berada *di luar* sistem — tepat jenis benda yang tidak tersedia dalam kerangka Wheeler-DeWitt. Maka Barontini bertanya: dapatkah sejarah sektor terang **diurutkan hanya dengan besaran yang berada di dalam sistem**? Jawabannya adalah sebuah jam yang ia sebut **waktu entropik**, yang dibaca langsung dari citra yang sama melalui tiga langkah sederhana. Pertama, dari setiap citra absorpsi ia mengekstrak empat angka untuk sektor terang: jumlah atom, pusat massa profil kerapatannya (yang memainkan peran sebagai analog "medan skalar"), lebarnya, dan entropinya — entropi per atom yang diperoleh dengan metode standar, dikalikan dengan jumlah atom. Kedua, ketika atom melintasi penghalang, entropi itu naik dan turun. Ketiga, jam mengikuti gradien entropi di sepanjang lintasan pusat massa yang diukur, menghitung besar setiap perpindahan alih-alih arahnya. Ketika entropi dan pusat massa naik atau turun bersama, setiap langkah tetap memajukan jam bahkan ketika awan berbalik arah. Dalam data, hal ini menghasilkan satu urutan dari "big bang" sektor hingga "big crunch" hampir di mana-mana, hanya dengan beberapa riak kecil ketika pengambilan sampel yang kasar membuat kedua perubahan tersebut tidak sejalan.

Terakhir, ia menurunkan sebuah **"persamaan Schrodinger waktu-entropik"** efektif — persamaan evolusi untuk sektor terang yang ditulis dalam jam internal ini alih-alih waktu eksternal — lalu menyelesaikannya secara numerik untuk melihat apakah persamaan tersebut mereproduksi apa yang benar-benar direkam kamera.

Apa yang ditemukan

Tiga hasil, dengan tingkat ambisi yang meningkat.

- **Jam internal bekerja sebagai pengurutan.** Waktu entropik meningkat secara monoton hampir di seluruh data, dan kecepatannya ditentukan oleh seberapa cepat entropi melintasi penghalang: jam berjalan lebih cepat ketika entropi dipertukarkan dan **berhenti sepenuhnya ketika tidak ada pertukaran**. Dalam rezim reversibel dengan penghalang rendah, *tidak ada waktu internal yang berlalu sama sekali* antara satu big crunch dan big bang berikutnya — karena tidak ada entropi yang dipertukarkan di sana — meskipun jam laboratorium terus berdetak. Di seluruh kumpulan data, entropi total kedua sektor bersama-sama tetap konstan dalam batas galat, sebagaimana diharapkan dari sistem tertutup.
- **Rezim berbeda menghasilkan "waktu" yang berbeda.** Naikkan penghalang dan pertukaran entropi mengecil, sehingga jam internal berjalan lebih lambat. Jika penghalang dinaikkan hingga kedua sektor hampir tidak berinteraksi, sektor terang mendekati apa yang disebut makalah sebagai "**kematian panas**": keadaan stasioner tempat waktu entropik berhenti begitu saja.
- **Persamaan efektif mereproduksi data.** Persamaan Schrodinger waktu-entropik, ketika diberi parameter eksperimen, secara numerik memulihkan evolusi lebar awan yang diukur. Makalah melaporkan kecocokan sangat baik untuk kasus penghalang rendah (tempat suku yang digerakkan entropi mendominasi); perbandingan numerik eksplisit memang dilakukan untuk kasus tersebut.

Apa itu "problem of time", dan apa itu "waktu entropik" di sini

Problem of time muncul karena persamaan utama gravitasi kuantum kanonik (Wheeler-DeWitt) tidak memiliki variabel waktu eksternal. Salah satu jawaban umum bersifat *relasional*: pilih satu besaran fisik di dalam sistem sebagai "jam", lalu gambarkan segala sesuatu yang lain relatif terhadapnya. Kesulitan yang berulang adalah bahwa pilihan jam alami tidak selalu monoton — dalam sistem yang mengempis kembali, calon jam berjalan maju lalu mundur — sehingga tidak dapat memberi label bersih pada satu arah dari awal hingga akhir.
Waktu entropik adalah cara Barontini mengatasi hal tersebut. Alih-alih membaca variabel mirip posisi, ia membangun jam dari *entropi* yang dipertukarkan antara sektor yang diamati dan yang tidak diamati, dengan konstruksi yang tidak berbalik arah. Secara semangat, gagasan ini berkerabat dengan ide "thermal time" yang lebih tua, tetapi di sini didefinisikan secara operasional dari aliran entropi yang dapat diukur, bukan dari struktur matematika abstrak — justru karena itu ia dapat diuji pada perangkat nyata.
Yang penting, istilah kosmologis — "big bang", "big crunch", "scale factor", "scalar field", "mini-universe" — adalah **label analog**. Istilah itu menamai ciri-ciri gas atom yang terperangkap yang kebetulan *secara struktural mirip* dengan persamaan model kosmologi sederhana. Mereka bukan pernyataan tentang alam semesta yang sebenarnya.

Apa yang tidak dibuktikan penelitian ini

Di sinilah kehati-hatian paling penting, karena kosakatanya mudah mendorong klaim berlebihan.

- **Penelitian ini tidak menyelesaikan problem of time, dan tidak mengklaim demikian.** Bingkai makalah sendiri adalah bahwa eksperimen ini "membangun lingkungan eksperimen terkendali tempat konstruksi waktu relasional dapat diuji secara kuantitatif." Sebuah testbed bukan teorema. Apakah waktu relasional atau entropik merupakan penjelasan yang *benar* tentang waktu dalam gravitasi kuantum tetap sama terbukanya seperti sebelumnya.
- **Ini adalah analog, bukan alam semesta.** Tidak ada kosmologi yang sedang diamati. Yang diamati adalah kondensat Bose-Einstein di dalam perangkap, dan deskripsi tereduksinya *secara matematis mirip* dengan model kosmologi sederhana ("minisuperspace"). Kemiripan itu adalah inti eksperimennya sekaligus batasnya. Tidak ada yang menunjukkan bahwa alam semesta awal mengalami big bang jenis ini, bahwa ruang-waktu terbuat dari atom, atau bahwa "waktu tidak ada."
- **Penelitian ini tidak menunjukkan bahwa waktu 'sebenarnya' adalah entropi.** Jam entropik adalah satu konstruksi pengurutan yang bekerja baik pada sistem ini. Makalah mencatat kedekatan konseptual dengan hipotesis thermal-time tetapi secara eksplisit membiarkan terbuka apakah keduanya bahkan sama. "Jam internal yang dibangun dari entropi dapat mengurutkan eksperimen ini" jauh lebih sempit daripada "waktu adalah entropi."
- **Persamaan efektif adalah hasil pemodelan, bukan penulisan ulang mekanika kuantum.** Persamaan Schrodinger waktu-entropik yang diturunkan mereduksi ke mekanika kuantum biasa ketika aliran entropi lambat, dan sepenuhnya merupakan teori uniter biasa hanya ketika tidak ada aliran entropi sama sekali. Makalah menempatkannya sebagai bentuk yang lebih umum daripada

persamaan standar *secara khusus ketika sistem yang diamati terbuka secara termodinamik terhadap sistem yang tidak diamati* — pernyataan tentang subsistem terbuka dalam jenis pengaturan ini, bukan klaim bahwa fisika fundamental harus ditulis ulang demikian.

- **Ini satu eksperimen, satu penulis, satu pilihan jam.** Hasilnya memiliki kira-kira 5% ketidakpastian statistik per titik dan bergantung pada pendekatan medan-rata serta kerapatan yang dirata-ratakan. Pilihan jam dan coarse-graining merupakan keputusan pemodelan yang disengaja, jenis keputusan yang perlu diuji kelompok lain sebelum ditarik kesimpulan struktural.

Seberapa kuat buktinya

Untuk klaim terbatas yang benar-benar dibuat, buktinya bersih. Sistem memang terisolasi dengan baik pada skala waktu relevan, pembukuan entropinya menutup (entropi total konstan dalam batas galat), jam internal mengurutkan data secara monoton hampir di seluruhnya, dan sebuah persamaan efektif yang diturunkan penulis dari model yang sama, dengan parameter yang diinferensikan dari data, mereproduksi dinamika terukur untuk kasus penghalang rendah tempat persamaan itu diterapkan. Datanya tersedia secara terbuka. Ini adalah pengukuran nyata dari sistem nyata dan terkendali, bukan eksperimen pikiran.

Beban kesimpulan yang dapat ditanggungnya juga terbatas. Semuanya bergantung pada analogi antara model kondensat tereduksi dan kosmologi minisuperspace, dan analogi dapat menerangi tanpa membuktikan. Satu platform dari satu penulis yang menunjukkan bahwa satu resep waktu internal bekerja merupakan bukti prinsip yang kuat, tetapi dasar lemah untuk klaim tentang bagaimana waktu berperilaku di alam. Bacaan yang tepat adalah: metode ini sekarang sesuatu yang dapat *dilakukan* di laboratorium, lalu diperiksa.

Mengapa ini penting

Perdebatan tentang problem of time sudah lama terjebak pada tingkat formalisme, tempat proposal yang bersaing sulit difalsifikasi karena hanya menghasilkan sedikit prediksi konkret yang dapat diukur. Mengubah bahkan satu sudut perdebatan tersebut menjadi eksperimen yang dapat dijalankan — tempat jam internal bisa atau tidak bisa mengurutkan data, tempat persamaan efektif bisa atau tidak bisa cocok dengan data — mengubah sifat argumennya. Ini memberi para teoretikus sebuah bangku laboratorium untuk menguji perangkat konseptual mereka.

Itulah kontribusi sebenarnya: bukan jawaban tentang waktu, melainkan **tempat untuk mengajukan pertanyaan itu secara kuantitatif**. Platform atom dingin sebelumnya telah menjadi analog terkendali untuk radiasi Hawking, alam semesta yang mengembang, dan peluruhan vakum palsu; pekerjaan ini menambahkan waktu relasional dan arah waktu ke kotak alat tersebut. Nilainya ada pada eksperimen lanjutan yang dimungkinkan — pilihan jam berbeda, perilaku memantul versus singular, uji reversibilitas — yang kini dapat menjadi pengukuran, bukan hanya perhitungan.

Singkatnya

Seorang fisikawan membangun kondensat Bose-Einstein, membaginya dengan penghalang optik tipis menjadi bagian yang diamati dan tidak diamati, lalu menggunakan entropi yang mengalir di antara kedua bagian untuk membangun "waktu entropik" internal. Jam tersebut mengurutkan siklus ekspansi dan kolaps bagian yang diamati, berjalan cepat ketika entropi dipertukarkan dan berhenti ketika tidak ada pertukaran, dan sebuah persamaan efektif yang ditulis dalam waktu internal ini mereproduksi data terukur untuk kasus penghalang rendah yang diperiksa penulis. Pengaturan ini adalah analog dari "problem of time" dalam gravitasi kuantum kanonik: "big bang", "big crunch", dan "miniuniverse" adalah label bagi gas terperangkap yang secara matematis mirip dengan model kosmologi sederhana. Ini adalah testbed terkendali bagi gagasan waktu relasional — bukan solusi problem of time, bukan klaim tentang alam semesta nyata, dan bukan bukti bahwa waktu "sebenarnya" adalah entropi.

Penilaian tanpa berlebihan

Apa yang ditunjukkan makalah: Dalam satu sistem atom dingin yang terisolasi dengan baik, sebuah jam internal yang didefinisikan dari pertukaran entropi dapat mengurutkan dinamika yang diamati secara hampir monoton, dan persamaan "waktu-entropik" efektif mereproduksi evolusi terukur pada kasus penghalang rendah yang diperiksa.

Apa yang masuk akal tetapi belum ditunjukkan: Bahwa waktu entropik atau relasional merupakan penjelasan yang baik bagi waktu dalam gravitasi kuantum yang sebenarnya. Eksperimen ini konsisten dengan memperlakukan konstruksi seperti itu secara serius; ia tidak mengonfirmasinya sebagai deskripsi alam.

Apa yang tidak ditunjukkannya: Bahwa problem of time telah diselesaikan; bahwa gravitasi kuantum telah dipecahkan; bahwa alam semesta dimulai dengan big bang seperti ini; bahwa ruang-waktu muncul dari atom; atau bahwa "waktu tidak ada."

Keterbatasan utama: Satu platform, satu penulis, dan satu pilihan jam; kira-kira 5% ketidakpastian per titik; pendekatan medan-rata dan kerapatan rata-rata; dan terutama ketergantungan pada analogi antara kondensat terperangkap dan model kosmologi sederhana.

Seberapa besar keyakinan yang layak dimiliki pembaca umum? Tinggi bahwa eksperimen melakukan apa yang dilaporkannya pada sistemnya sendiri. Rendah untuk lompatan dari analog ini ke klaim tentang waktu di alam semesta nyata.

Sumber

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