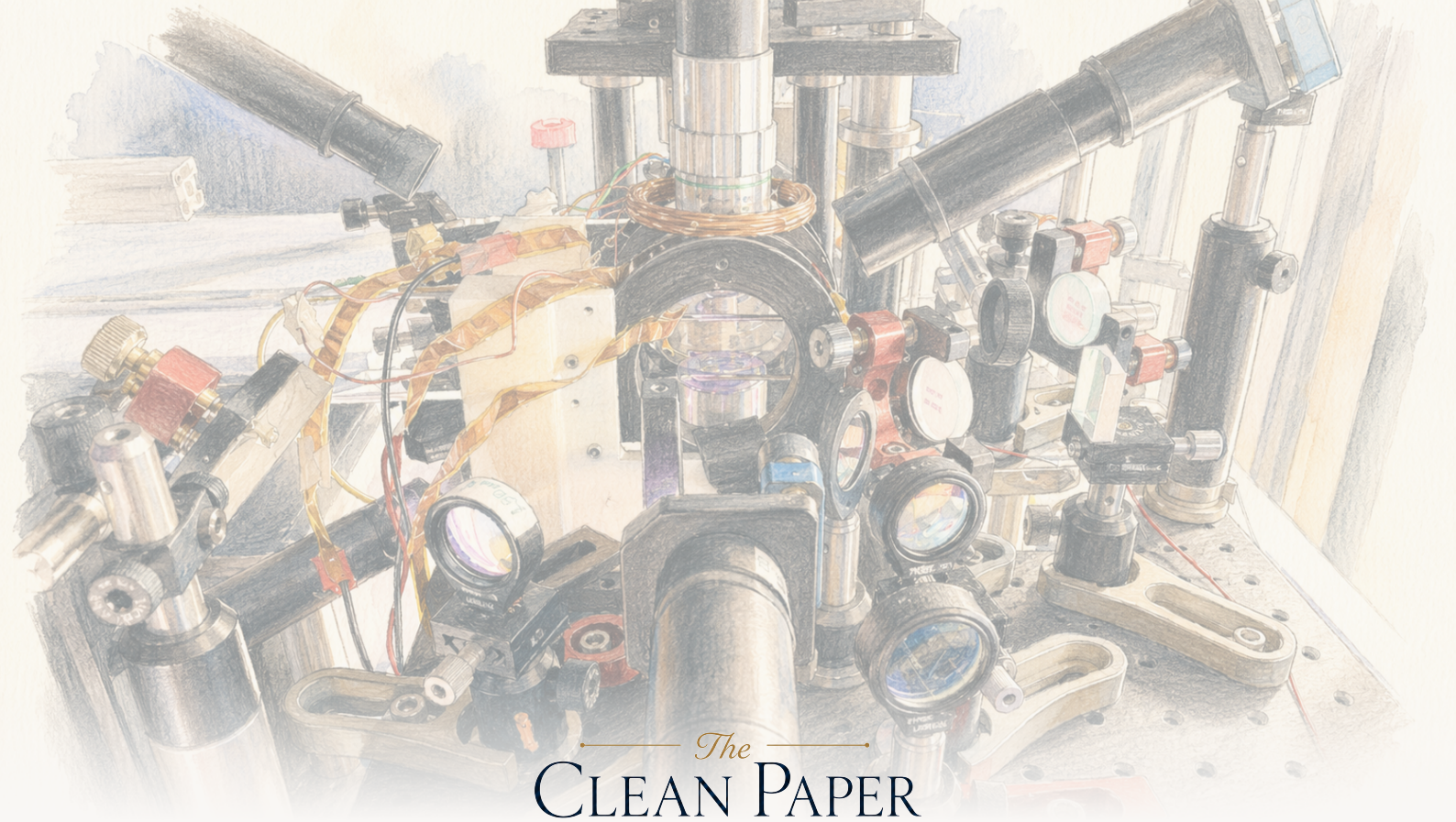

The Clean Paper

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

Eksperimen atom sejuk menguji 'masalah masa' dalam graviti kuantum — sebagai analogi makmal, bukan jawapan

Dalam graviti kuantum kanonik, persamaan Wheeler–DeWitt tidak mempunyai jam luaran untuk menyusun peristiwa: inilah 'masalah masa'. Satu eksperimen oleh seorang penyelidik mengasingkan kondensat Bose–Einstein, membahagikannya dengan penghadang optik nipis kepada sektor yang tidak diperhatikan dan sektor yang diperhatikan, kemudian membina jam dalaman daripada entropi yang mengalir antara kedua-duanya. 'Masa entropik' itu menyusun pengembangan dan keruntuhan sektor yang diperhatikan, dan persamaan berkesan menghasilkan semula data terukur dalam kes penghadang rendah yang diuji. Ini ialah platform ujian terkawal bagi idea masa relasional: 'big bang', 'big crunch' dan 'miniuniverse' hanyalah label analogi untuk gas terperangkap, bukan kosmologi sebenar, dan kajian ini tidak mendakwa telah menyelesaikan masalah masa atau graviti 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

Jam yang dibina daripada entropi, di dalam perangkap

Dalam graviti kuantum kanonik terdapat teka-teki yang ganjil dan sukar diatasi: persamaan utamanya tidak mempunyai masa di dalamnya. Persamaan Wheeler-DeWitt, padanan yang paling hampir dengan persamaan Schrödinger untuk keseluruhan alam semesta, pada asasnya menyatakan bahawa suatu operator yang bertindak pada keadaan menghasilkan sifar. Tiada parameter luaran yang berdetak, tiada sesuatu yang menyusun "sebelum" dan "selepas" — manakala kita jelas mengalami peredaran masa. Inilah **masalah masa**, dan masalah ini belum memperoleh penyelesaian yang diterima umum selama lebih daripada setengah abad.

Sebuah kajian oleh seorang penulis di *Physical Review Research* tidak menyelesaikannya. Apa yang dilakukan kajian itu lebih sederhana dan, dengan caranya sendiri, lebih berguna: membina sebuah sistem makmal kecil yang terkawal dengan baik, tempat satu keluarga jawapan yang pernah dicadangkan dapat **diuji terhadap data sebenar**. Giovanni Barontini dari University of Birmingham mengambil sebuah kondensat Bose-Einstein — awan atom ultradingin yang bertingkah laku sebagai satu objek kuantum — lalu mengubahnya menjadi analogi tempat idea masa "dalaman" dan relasional boleh diukur, bukan sekadar diperdebatkan. Triknya adalah membina jam bukan daripada jam randik di luar sistem, tetapi daripada entropi yang dipindah-pindahkan sistem di dalam dirinya sendiri.

Jarak antara "analogi terkawal bagi masalah masa" dan "ahli fizik telah memecahkan masa" adalah inti keseluruhan kisah ini, dan jaraknya sangat jauh.

Apa yang dilakukan penyelidik

Perantinya ialah kondensat mengandungi sekitar **24.000 atom rubidium-87** yang ditahan di dalam perangkap dipol optik konservatif dan dibuat berayun — keseluruhan awan atom bergerak bolak-balik di sepanjang perangkap. Sebuah **penghadang optik nipis** — lebarnya kira-kira 8 mikron, dibuat dengan cahaya 675 nm menggunakan peranti micromirror digital — membahagikan perangkap kepada dua bahagian. Satu bahagian diperhatikan ("**sektor terang**"); bahagian lain tidak ("**sektor gelap**"). Sepanjang tetingkap eksperimen sekitar 100 milidetik, sistem tidak menunjukkan kehilangan zarah atau pelesapan yang boleh diukur, sehingga dengan pendekatan yang baik ia merupakan sistem tertutup dengan Hamiltonian yang tidak bergantung pada masa.

[figure_pair pending]

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

Jika dilihat menggunakan jam makmal biasa — satu imej absorpsi setiap 2 ms — sektor terang melakukan sesuatu yang mengingatkan kepada analogi kosmologi. Atom mengalir melepasi penghadang dan sektor itu tumbuh dari sifar (Barontini menyatakan momen ini "**big bang**"), mencapai saiz maksimum, lalu menyusut dan kosong kembali ke bahagian gelap ("**big crunch**"). Bergantung pada tinggi penghadang, kitaran ini dapat berulang.

Di sinilah inti eksperimen. Jam makmal berada *di luar* sistem — tepat jenis rujukan yang tidak tersedia dalam rangka kerja Wheeler-DeWitt. Maka Barontini bertanya: bolehkah sejarah sektor terang **diurutkan hanya dengan kuantiti yang berada di dalam sistem**? Jawapannya ialah sebuah jam yang ia sebut **masa entropik**, yang dibaca terus dari imej yang sama melalui tiga langkah ringkas. Pertama, dari setiap imej absorpsi ia mengekstrak empat angka untuk sektor terang: jumlah atom, pusat jisim bagi profil ketumpatannya (yang memainkan peranan sebagai analogi "medan skalar"), lebarnya, dan entropinya — entropi per atom yang diperoleh dengan kaedah piawai, didarabkan dengan jumlah atom. Kedua, ketika atom melintasi penghadang, entropi itu naik dan turun. Ketiga, jam mengikuti gradien entropi di sepanjang lintasan pusat jisim yang diukur, mengira magnitud setiap sesaran, bukan arahnya. Ketika entropi dan pusat jisim naik atau turun bersama, setiap langkah tetap memajukan jam malah ketika awan berbalik arah. Dalam data, ini menghasilkan satu urutan dari "big bang" sektor hingga "big crunch" hampir di mana-mana, hanya dengan beberapa riak kecil ketika pensampelan kasar membuat kedua perubahan tersebut tidak sejalan.

Akhir sekali, beliau menerbitkan sebuah **"persamaan Schrodinger masa-entropik"** berkesan — persamaan evolusi untuk sektor terang yang ditulis dalam jam dalaman ini bukannya masa luaran — lalu menyelesaikannya secara numerik untuk melihat sama ada persamaan tersebut menghasilkan semula apa yang benar-benar direkodkan kamera.

Apa yang ditemui

Tiga hasil, dengan tahap tuntutan yang semakin tinggi.

- **Jam dalaman berfungsi sebagai penyusunan.** Masa entropik meningkat secara monoton hampir di keseluruhan data, dan kadarnya ditentukan oleh sejauh mana cepat entropi melintasi penghadang: jam berjalan lebih cepat ketika entropi dipertukarkan dan **berhenti sepenuhnya ketika tiada pertukaran**. Dalam rejim boleh balik dengan penghadang rendah, *tiada masa dalaman yang berlalu sama sekali* antara satu big crunch dan big bang seterusnya — kerana tiada entropi yang dipertukarkan di sana — walaupun jam makmal terus berdetak. Di keseluruhan set data, entropi keseluruhan kedua sektor bersama-sama tetap malar dalam had ralat, sebagaimana dijangka daripada sistem tertutup.
- **rejim berbeza menghasilkan "masa" yang berbeza.** Naikkan penghadang dan pertukaran entropi mengecil, sehingga jam dalaman berjalan lebih lambat. Jika penghadang dinaikkan hingga kedua sektor hampir tidak berinteraksi, sektor terang menghampiri apa yang disebut kajian sebagai "**kematian haba**": keadaan pegun di mana masa entropik berhenti begitu sahaja.
- **Persamaan berkesan menghasilkan semula data.** Persamaan Schrodinger masa-entropik, ketika diberi parameter eksperimen, secara numerik memulihkan evolusi lebar awan yang diukur. Kajian melaporkan padanan yang sangat baik untuk kes penghadang rendah (tempat terma yang digerakkan entropi mendominasi); perbandingan numerik jelas sememangnya dilakukan untuk kes tersebut.

Apa itu "masalah masa", dan apa itu "masa entropik" di sini

Masalah masa muncul kerana persamaan utama graviti kuantum kanonik (Wheeler-DeWitt) tidak mempunyai pemboleh ubah masa luaran. Salah satu jawapan umum bersifat *relasional*: pilih satu kuantiti fizikal di dalam sistem sebagai "jam", lalu gambarkan segala sesuatu yang lain relatif terhadapnya. Kesukaran yang berulang adalah bahawa calon jam yang semula jadi 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.
Masa entropik ialah cara Barontini mengatasi perkara tersebut. Daripada menggunakan pemboleh ubah seperti kedudukan, ia membina jam dari *entropi* yang dipertukarkan antara sektor yang diperhatikan dan yang tidak diperhatikan, dengan pembinaan yang tidak berbalik arah. Dari segi konsep, idea ini berkait dengan ideaa "thermal time" yang lebih tua, tetapi di sini ditakrifkan secara operasi daripada aliran entropi yang boleh diukur, bukan dari struktur matematik abstrak — dan oleh itu ia boleh diuji pada peranti sebenar.
Yang penting, istilah kosmologi — "big bang", "big crunch", "scale factor", "scalar field", "mini-universe" — adalah **label analogi**. Istilah itu menamai ciri-ciri gas atom yang terperangkap yang kebetulan *serupa dari segi struktur* dengan persamaan model kosmologi ringkas. Mereka bukan pernyataan tentang alam semesta yang sebenarnya.

Apa yang tidak dibuktikan kajian ini

Di sinilah kehati-hatian paling penting, kerana perbendaharaan katanya mudah mendorong dakwaan berlebihan.

- **Kajian ini tidak menyelesaikan masalah masa, dan tidak mendakwa sedemikian.** Bingkai kajian sendiri adalah bahawa eksperimen ini "membina persekitaran eksperimen terkawal tempat pembinaan masa relasional dapat diuji secara kuantitatif." Pelantar ujian bukan teorem. Sama ada masa relasional atau entropik merupakan penjelasan yang *benar* tentang masa dalam graviti kuantum tetap sama terbukanya seperti sebelum ini.
- **Ini adalah analogi, bukan alam semesta.** Tiada kosmologi yang sedang diperhatikan. Yang diperhatikan adalah kondensat Bose-Einstein di dalam perangkap, dan huraian tereduksinya *serupa secara matematik* dengan model kosmologi ringkas ("minisuperspace"). Keserupaan itu adalah inti eksperimennya serentak batasnya. Tiada yang menunjukkan bahawa alam semesta awal mengalami big bang jenis ini, bahawa ruang-masa terbuat daripada atom, atau bahawa "masa tidak wujud."
- **Kajian ini tidak menunjukkan bahawa masa 'sebenarnya' adalah entropi.** Jam entropik ialah satu kaedah penyusunan yang berfungsi baik pada sistem ini. Kajian merekodkan kedekatan konseptual dengan hipotesis thermal-time tetapi secara jelas membiarkan terbuka adakah keduaduanya sebenarnya sama. "Jam dalaman yang dibina daripada entropi boleh menyusun eksperimen ini" jauh lebih sempit daripada "masa adalah entropi."
- **Persamaan berkesan adalah hasil pemodelan, bukan penulisan semula mekanik kuantum.** Persamaan Schrodinger masa-entropik yang diturunkan beralih kepada mekanik kuantum biasa

ketika aliran entropi lambat, dan menjadi teori uniter biasa sepenuhnya hanya ketika tiada aliran entropi sama sekali. Kajian menempatkannya sebagai bentuk yang lebih umum daripada persamaan piawai *secara khusus ketika sistem yang diperhatikan terbuka secara termodinamik terhadap sistem yang tidak diperhatikan* — kenyataan tentang subsistem terbuka dalam jenis tetapan ini, bukan dakwaan bahawa fizik fundamental perlu ditulis ulang sedemikian.

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

Sejauh mana kukuhnya bukti?

Untuk dakwaan terhad yang benar-benar dibuat, buktinya bersih. Sistem sememangnya terasing dengan baik pada skala masa relevan, imbangan entropinya sepadan (entropi keseluruhan malar dalam had ralat), jam dalaman menyusun data secara hampir monoton sepanjang data, dan sebuah persamaan berkesan yang diturunkan penulis daripada model yang sama, dengan parameter yang disimpulkan daripada data, menghasilkan semula dinamik boleh diukur untuk kes penghadang rendah tempat persamaan itu diterapkan. Datanya tersedia secara terbuka. Ini adalah pengukuran sebenar daripada sistem sebenar dan terkawal, bukan eksperimen pemikiran.

Beban kesimpulan yang boleh disokongnya juga terhad. Kesemuanya bergantung pada analogi antara model kondensat tereduksi dan kosmologi minisuperspace, dan analogi dapat menerangi tanpa membuktikan. Satu platform daripada satu penulis yang menunjukkan bahawa satu kaedah masa dalaman berfungsi merupakan bukti prinsip yang kukuh, tetapi asas yang lemah untuk dakwaan tentang bagaimana masa bertingkah laku di alam. Bacaan yang tepat adalah: kaedah ini kini sesuatu yang boleh *dilakukan* di makmal, lalu diperiksa.

Mengapa ini penting

Perdebatan tentang masalah masa telah lama terjebak pada tahap formalisme, di mana cadangan yang bersaing sukar difalsifikasi kerana hanya menghasilkan sedikit ramalan konkrit yang boleh diukur. Mengubah malah satu sudut perdebatan tersebut menjadi eksperimen yang boleh dijalankan — di mana jam dalaman boleh atau tidak boleh menyusun data, di mana persamaan berkesan boleh atau tidak boleh sepadan dengan data — mengubah sifat hujahnya. Ini memberi ahli teori sebuah pelantar makmal untuk menguji peranti konseptual mereka.

Itulah sumbangan sebenarnya: bukan jawapan tentang masa, tetapi **tempat untuk mengemukakan persoalan itu secara kuantitatif**. Platform atom sejuk sebelum ini telah menjadi analogi terkawal untuk sinaran Hawking, alam semesta yang mengembang, dan peluruhan vakum palsu; kajian ini menambahkan masa relasional dan arah masa ke kotak alat tersebut. Nilainya ada pada eksperimen lanjutan yang menjadi mungkin — pilihan jam berbeza, tingkah laku memantul versus singular, ujian

kebolehbalikan — yang kini dapat menjadi pengukuran, bukan hanya pengiraan.

Ringkasan utama

Seorang ahli fizik membina kondensat Bose-Einstein, membahagikannya menggunakan penghadang optik nipis menjadi bahagian yang diperhatikan dan tidak diperhatikan, lalu menggunakan entropi yang mengalir di antara kedua bahagian untuk membina "masa entropik" dalaman. Jam tersebut menyusun kitaran pengembangan dan kolaps bahagian yang diperhatikan, berjalan cepat ketika entropi dipertukarkan dan berhenti ketika tiada pertukaran, dan sebuah persamaan berkesan yang ditulis dalam masa dalaman ini menghasilkan semula data boleh diukur untuk kes penghadang rendah yang diperiksa penulis. Tetapan ini adalah analogi bagi "masalah masa" dalam graviti kuantum kanonik: "big bang", "big crunch", dan "miniuniverse" adalah label bagi gas terperangkap yang serupa secara matematik dengan model kosmologi ringkas. Ini ialah pelantar ujian terkawal bagi idea masa relasional — bukan penyelesaian masalah masa, bukan dakwaan tentang alam semesta sebenar, dan bukan bukti bahawa masa "sebenarnya" adalah entropi.

Semakan tanpa sensasi

Apa yang ditunjukkan kajian: Dalam satu sistem atom sejuk yang terasing dengan baik, sebuah jam dalaman yang ditakrifkan daripada pertukaran entropi boleh menyusun dinamik yang diperhatikan secara hampir monoton, dan persamaan "masa-entropik" berkesan menghasilkan semula evolusi boleh diukur pada kes penghadang rendah yang diperiksa.

Apa yang munasabah tetapi belum ditunjukkan: Bahawa masa entropik atau relasional merupakan penjelasan yang baik bagi masa dalam graviti kuantum yang sebenarnya. Eksperimen ini selaras dengan mengambil pembinaan seperti itu secara serius; ia tidak mengesahkannya sebagai huraian tentang alam.

Apa yang tidak ditunjukkannya: Bahawa masalah masa telah diselesaikan; bahawa graviti kuantum telah dipecahkan; bahawa alam semesta bermula dengan big bang seperti ini; bahawa ruang-masa muncul daripada atom; atau bahawa "masa tidak wujud."

Had utama: Satu platform, satu penulis, dan satu pilihan jam; kira-kira 5% ketidakpastian per titik; pendekatan medan min dan kerapatan purata; dan terutamanya kebergantungan pada analogi antara kondensat terperangkap dan model kosmologi ringkas.

Sejauh mana keyakinan yang wajar bagi pembaca umum? Tinggi bahawa eksperimen melakukan apa yang dilaporkannya pada sistemnya sendiri. Rendah untuk lompatan dari analogi ini ke dakwaan tentang masa di alam semesta sebenar.

Sumber

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