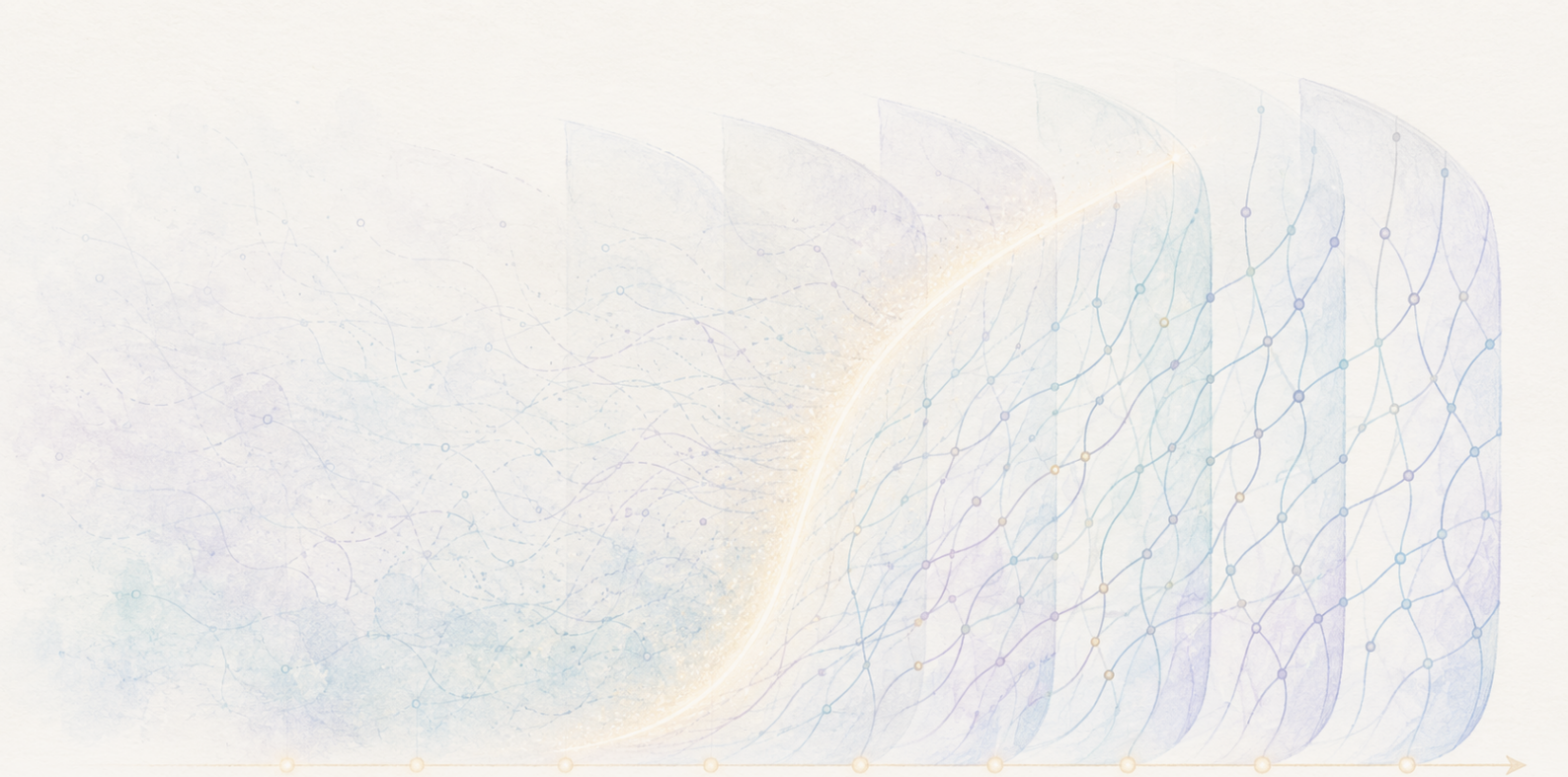




The CLEAN PAPER

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

Model klasik lima dimensi mencoba membangun ulang perilaku kuantum tanpa menguantisasi gravitasi

Sebuah makalah Scientific Reports mengusulkan kerangka 4D + tau di mana ruang-waktu bisa berevolusi di bawah parameter tambahan. Dalam simulasi dan perhitungan model, kerangka memulihkan gravitasi Newton pada kesetimbangan, bergerak menuju struktur dasar relativitas umum, dan mereproduksi korelasi tipe EPR serta interferensi mirip celah ganda melalui dinamika garis dunia. Hasilnya adalah konstruksi teoretis yang provokatif, bukan bukti eksperimen bahwa gravitasi kuantum telah diselesaikan atau mekanika kuantum standar salah.

Written by Matteo · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *A five-dimensional classical framework for gravitational and quantum phenomena*, Filip Strubbe, Scientific Reports 16, Article 2965 (2026) · DOI: 10.1038/s41598-025-32860-8

Jalur klasik menuju gravitasi kuantum adalah klaim yang berani. Yang ini masih berupa model.

Sebagian besar upaya untuk menggabungkan mekanika kuantum dengan gravitasi dimulai dengan mencoba menguantisasi gravitasi. Makalah baru di Scientific Reports oleh Filip Strubbe mencoba arah sebaliknya: mempertahankan fondasi klasik, menambahkan parameter evolusi ekstra, lalu bertanya apakah efek gravitasi yang familier dan beberapa fenomena kuantum dapat muncul dari dinamika klasik yang lebih besar itu.

Itu adalah langkah yang provokatif. Dan juga mudah dibesar-besarkan.

Makalah ini tidak menyelesaikan gravitasi kuantum. Ia tidak menunjukkan bahwa mekanika kuantum salah. Ia tidak membantah teorema Bell atau membuktikan bahwa alam semesta diam-diam hanyalah mesin jam sederhana. Yang ditawarkannya adalah kerangka klasik lima dimensi yang diusulkan, yang dalam model dapat mereproduksi beberapa perilaku gravitasi dan perilaku mirip-kuantum tertentu, serta menghasilkan beberapa prediksi yang mungkin berbeda dari teori kuantum standar.

Pertanyaan yang berguna bukan “apakah fisika klasik telah mengalahkan fisika kuantum?” Belum. Pertanyaan yang berguna lebih sempit: apa yang harus dilepaskan atau ditambahkan oleh teori klasik agar dapat meniru sebagian hal yang tidak dapat ditiru fisika klasik empat dimensi standar?

Dalam makalah ini, unsur tambahannya bukan dimensi ruang kelima. Unsur itu adalah parameter tambahan, yang disebut tau, yang mengatur evolusi ruang-waktu empat dimensi biasa.

Waktu tambahan yang bukan waktu biasa

Kerangka dimulai dengan ruang-waktu empat dimensi biasa: satu koordinat waktu dan tiga koordinat ruang. Lalu ia menambahkan parameter evolusi eksternal, tau. Waktu koordinat memberi label peristiwa di dalam ruang-waktu. Tau mengatur bagaimana keseluruhan konfigurasi ruang-waktu berelaksasi menuju kesetimbangan.

Perbedaan itu adalah tulang punggung usulan ini. Makalah menyebutnya kerangka 4D + tau. Secara formal, kerangka ini lima dimensi, tetapi penulis berhati-hati mengenai artinya: tidak ada metrik lima dimensi yang menggantikan metrik ruang-waktu empat dimensi biasa. Sebaliknya, tau adalah parameter yang menggerakkan dinamika geometri empat dimensi dan garis dunia partikel di dalamnya.

Gambaran yang diajukan sengaja tidak biasa. Objek dasarnya bukan fungsi gelombang. Objek dasarnya adalah garis dunia: lintasan melalui ruang-waktu yang dapat berevolusi ketika tau berubah. Makalah membayangkan ruang-waktu secara bertahap “mengkristal” sepanjang dimensi waktu. Di belakang garis depan kristalisasi, konfigurasi telah berelaksasi menjadi hasil yang stabil; di depannya, masa depan belum tersusun dengan cara yang sama.

Bagi pengamat di dalam sistem, hanya hasil yang sudah mencapai kesetimbangan yang dapat diakses. Pengamat tidak melihat tau secara langsung. Pengamat menyusun kembali sejarah empat dimensi biasa dari urutan hasil yang telah mengkristal.

Begitulah makalah mencoba memperoleh dua hal sekaligus: dinamika dasar yang deterministik dan klasik, serta tampilan waktu biasa, hasil pengukuran, dan perilaku mirip-kuantum dari dalam sistem.

Gravitasi dulu: Newton, lalu sebagian Einstein

Bagian gravitasi makalah dimulai pada batas gravitasi lemah. Penulis menuliskan persamaan relaksasi untuk potensial gravitasi. Ketika sistem mencapai kesetimbangan terhadap tau, persamaan itu mereduksi menjadi persamaan Poisson Newton biasa untuk gravitasi.

Makalah juga memberi garis dunia aturan relaksasinya sendiri. Pada kesetimbangan, garis dunia didorong menuju lintasan yang diharapkan dari gravitasi Newton. Contoh numeriknya sengaja sederhana: misalnya, satu massa statis dan sistem dua massa yang berelaksasi menuju ruang-waktu Newtonian.

Penulis kemudian memperluas gagasan yang sama ke arah relativitas umum. Alih-alih hanya merelaksasikan potensial Newtonian, kerangka merelaksasikan metrik ruang-waktu itu sendiri. Pada kesetimbangan, garis dunia menjadi **geodesik**: lintasan yang diikuti benda yang jatuh bebas ketika tidak ada gaya selain gravitasi, yaitu padanan garis lurus dalam ruang-waktu melengkung. Geometrinya dimaksudkan untuk memulihkan ciri-ciri dasar relativitas umum.

Catatannya penting. Makalah ini bukan derivasi lengkap setiap prediksi medan kuat relativitas umum. Makalah secara eksplisit meninggalkan rezim medan kuat, singularitas, pergeseran merah gravitasi, gelombang gravitasi, dan perilaku garis dunia yang lebih kaya untuk penelitian masa depan. Klaimnya adalah bahwa kerangka dapat memulihkan gravitasi Newton dalam batas lemah dan struktur dasar relativitas umum dalam pengaturan yang lebih halus, bukan bahwa ia telah menggantikan seluruh perangkat gravitasi Einstein yang sudah teruji.

Langkah pada uji Bell: mengubah asumsi ruang-waktu

Bagian tersulit dari penjelasan klasik mana pun atas mekanika kuantum adalah nonlokalitas.

Teorema Bell memberi tahu kita bahwa, di bawah asumsi standar, tidak ada model variabel tersembunyi lokal yang dapat mereproduksi semua korelasi kuantum. Eksperimen telah berulang kali melanggar ketaksamaan Bell. Itulah sebabnya gambaran klasik empat dimensi biasa gagal.

Ketaksamaan Bell dalam bahasa sederhana

Bayangkan dua partikel meninggalkan sumber yang sama sambil membawa lembar instruksi tersembunyi. Jauh terpisah, Alice dan Bob secara independen memilih bagaimana mengukur partikel mereka. Jika setiap hasil ditentukan oleh lembar instruksi lokalnya, tidak ada pihak yang dapat dipengaruhi pilihan pihak lain, dan pengaturan pengukuran secara statistik independen dari instruksi tersebut, maka ketaksamaan Bell memberi batas atas pada seberapa kuat dua kumpulan hasil dapat berkorelasi. Eksperimen nyata melampaui batas itu. Kesimpulannya bukan bahwa satu alternatif tertentu pasti benar, tetapi bahwa realisme, lokalitas, dan independensi statistik tidak dapat semuanya dipertahankan sekaligus.

Untuk derivasi langkah demi langkah tentang batas lokal, prediksi kuantum, dan pengujian eksperimennya, lihat panduan kami tentang teorema Bell.

Jawaban makalah bukan menyangkal teorema Bell. Makalah mengubah latar tempat teorema diterapkan. Dalam kerangka $4D + \tau$, pengaruh dapat merambat sepanjang garis dunia ketika konfigurasi berevolusi dalam τ . Dari sudut pandang ruang-waktu biasa, ini dapat terlihat seperti korelasi non-lokal. Dari sudut pandang dinamika dasar yang diusulkan, interaksinya lokal sepanjang garis dunia yang relevan dalam τ .

Makalah memodelkan eksperimen tipe EPR dengan dua foton yang diukur oleh Alice dan Bob. Model mereproduksi korelasi kuantum standar untuk keadaan polarisasi terbelit maksimal. Harga formalnya dinyatakan secara eksplisit: model sepenuhnya melepaskan independensi statistik, dengan pengukuran Alice lebih dahulu mengondisikan keadaan Bob melalui dinamika τ . Mekanismenya bukan keruntuhan kuantum standar; mekanismenya adalah relaksasi keadaan polarisasi yang digerakkan τ sepanjang garis dunia yang terhubung.

Apa yang sebenarnya dibandingkan Alice dan Bob

Sebuah sumber mengirim satu foton kepada Alice dan pasangannya kepada Bob. Masing-masing menggunakan pemisah berkas terpolarisasi yang diatur pada sudut tertentu dan mencatat satu dari dua hasil: lolos atau dibelokkan. Satu pasangan saja tidak dapat mengungkapkan korelasi. Uji dilakukan dengan mengulangi eksperimen dan membandingkan seberapa sering dua hasil cocok ketika sudut antara pemisah berubah. Teori kuantum memprediksi korelasi yang lebih kuat daripada yang diizinkan instruksi tersembunyi lokal dan independen secara statistik. Dalam model Strubbe, pengukuran Alice terjadi lebih dahulu dalam τ ; relaksasi polarisasi kemudian merambat sepanjang garis dunia yang terhubung, kembali melalui sumber bersama dan terus sepanjang lintasan Bob, sehingga keadaan Bob sudah terkondisi ketika ia mengukur. Itu mereproduksi korelasi dalam model, tetapi hanya dengan mengubah latar kausal dan melepaskan independensi statistik.

Bagian ini membutuhkan batas paling tegas. Mereproduksi satu model tipe EPR di dalam kerangka yang diusulkan tidak sama dengan menurunkan seluruh teori kuantum dari mekanika klasik. Makalah sendiri mencatat bahwa penyimpangan dari prediksi kuantum standar mungkin muncul jika transfer informasi sepanjang garis dunia terlalu lambat, atau jika pemisahan spasial cukup besar sehingga satu pengukuran selesai sebelum informasi hasil yang relevan sempat merambat

dalam tau.

Itu adalah jalur prediksi, bukan putaran kemenangan.

Celah ganda, dibangun ulang sebagai garis dunia yang bergerak

Demonstrasi kuantum kedua adalah interferensi celah ganda.

Makalah memodelkan partikel bermassa, khususnya neutron, sebagai sekumpulan garis dunia, bukan sebagai satu titik klasik atau fungsi gelombang kuantum standar. Dalam contoh, neutron memiliki panjang gelombang de Broglie 2 nm dan kecepatan 2,000 m/s. Lebar celah simulasi adalah 10 nm dan jarak antarcelah 25 nm, dipilih lebih kecil daripada eksperimen interferensi neutron tipikal agar pola lebih mudah terlihat.

Kumpulan garis dunia berevolusi mengikuti aturan entropik. Kepadatan titik akhir garis dunia menghasilkan distribusi mirip interferensi, sementara satu “garis dunia momentum” yang dipilih membawa energi dan momentum serta menentukan peristiwa deteksi aktual. Begitulah makalah memisahkan perilaku mirip-gelombang dari hasil mirip-partikel tanpa menggunakan superposisi kuantum intrinsik.

Makalah kemudian bertanya apa yang akan diungkap gravitasi. Pada setiap neutron simulasi, banyak garis dunia berkontribusi pada kepadatan mirip interferensi, tetapi hanya garis dunia momentum yang dipilih yang membawa energi dan momentum serta menjadi sumber gravitasi. Model menempatkan satu probe gravitasi ideal di titik tengah antara kedua celah dan dua lagi secara simetris di kiri dan kanan. Jika garis dunia momentum melewati celah kanan alih-alih kiri, respons gravitasi yang sangat kecil ikut bergeser. Membaca asimetri itu akan mengungkap celah yang dipilih, sementara seluruh kumpulan garis dunia tetap membentuk pola interferensi pada layar. Perkiraan sinyal percepatan sekitar $2 \times 10^{-23} \text{ m s}^{-2}$, dan makalah secara eksplisit mengesampingkan keterbatasan pengukuran praktis.

Angka itu penting karena memperjelas skala klaim yang sebenarnya. Usulannya bukan bahwa seseorang sudah mengukur informasi lintasan melalui gravitasi tanpa mengganggu interferensi. Usulannya adalah bahwa, dalam model ini, informasi seperti itu secara prinsip seharusnya dapat diakses karena medan gravitasi terikat pada satu garis dunia pasti, bukan superposisi dua lintasan.

Hal ini secara langsung berbeda dari harapan kuantum standar bahwa informasi lintasan menghancurkan interferensi. Karena itu, kerangka ini juga menghasilkan sebuah perbedaan empiris yang, setidaknya secara prinsip, dapat diuji.

Apa yang tidak dibuktikan

- Makalah ini **tidak** membuktikan bahwa gravitasi kuantum telah diselesaikan.
- Makalah ini **tidak** membuktikan bahwa gravitasi pada dasarnya bersifat klasik.
- Makalah ini **tidak** membantah teorema Bell; ia mengubah latar kausalitas ruang-waktu dan mere-laksasikan independensi statistik dalam model.
- Makalah ini **tidak** mereproduksi seluruh mekanika kuantum. Ia memodelkan fenomena tertentu dan meninggalkan formalisme kuantum lengkap untuk penelitian masa depan.
- Makalah ini **tidak** menunjukkan bahwa relativitas umum telah sepenuhnya dipulihkan dalam rezim medan kuat.
- Makalah ini **tidak** membuat fungsi gelombang, ruang Hilbert, bilangan kompleks, atau teori medan kuantum menjadi tidak berguna.
- Makalah ini **tidak** memberikan konfirmasi eksperimen. Pekerjaan ini bersifat teoretis dan berba-sis simulasi.

Batas klaimnya dapat diringkas seperti ini: makalah mengusulkan kerangka klasik berdimensi lebih tinggi yang dapat meniru beberapa perilaku sulit. Makalah belum menunjukkan bahwa alam benar-benar menggunakan kerangka tersebut.

Bagaimana kerangka ini dapat diuji?

Bagian paling bernilai dari makalah adalah bahwa ia tidak berhenti pada filsafat. Ia menunjukkan tempat-tempat di mana kerangka ini dapat berbeda dari teori kuantum standar.

Satu prediksi menyangkut eksperimen tipe EPR. Jika transfer informasi melalui garis dunia yang dimediasi tau tidak efektif seketika relatif terhadap proses kristalisasi, maka pengaturan pengukuran dengan jarak cukup besar atau cukup cepat dapat menyimpang dari korelasi kuantum biasa.

Prediksi lain menyangkut eksperimen celah ganda dengan partikel bermassa. Model mengatakan bahwa informasi lintasan gravitasi secara prinsip dapat diekstraksi tanpa menghilangkan pola in-terferensi. Ini kontras tajam dengan penalaran kuantum standar, meskipun sinyal yang diusulkan sangat kecil dan kelayakan praktisnya belum ditetapkan.

Prediksi ketiga menyangkut usulan pengujian apakah gravitasi dapat memediasi keterbelitan antara massa. Banyak usulan uji gravitasi kuantum saat ini menganggap keterbelitan yang dimediasi gravitasi sebagai bukti bahwa gravitasi harus memiliki ciri kuantum. Dalam kerangka Strubbe, medan gravitasi diberikan kepada satu garis dunia pasti, sehingga keterbelitan yang diinduksi gravitasi semacam itu seharusnya tidak terjadi.

Itu bukan perbedaan kecil. Justru perbedaan seperti itulah yang dibutuhkan kerangka spekulatif jika ingin menjadi lebih dari sekadar interpretasi.

Seberapa kuat buktinya?

Bukti paling kuat adalah sebagai demonstrasi konsistensi internal.

Makalah menyajikan persamaan, simulasi, dan contoh model yang menunjukkan bagaimana perangkat 4D + tau dapat memulihkan gravitasi Newton pada kesetimbangan, bergerak menuju struktur relativitas umum, mereproduksi model korelasi tipe EPR, dan menghasilkan pola interferensi mirip celah ganda untuk partikel bermassa.

Namun bukti tersebut belum kuat sebagai bukti tentang dunia nyata.

Demonstrasinya selektif. Kerangka belum diperluas menjadi formalisme kuantum yang lengkap. Kasus gravitasi kuat belum diselesaikan. Penyimpangan eksperimen yang diusulkan belum diamati. Pernyataan ketersediaan data menyebut bahwa kumpulan data yang dibuat dan dianalisis dalam studi tersedia dari penulis korespondensi atas permintaan yang wajar, tetapi klaim inti bukan pengukuran baru; klaimnya adalah konstruksi teoretis.

Itu bukan kekurangan dengan sendirinya. Kerangka baru sering berawal sebagai konstruksi. Namun pembacaan yang bersih harus menjaga konstruksi, simulasi, prediksi, dan konfirmasi dalam kotak yang terpisah.

Mengapa ini penting

Makalah tentang fondasi fisika dapat terdengar megah karena kosakatanya memang megah: gravitasi kuantum, nonlokalitas, waktu, realisme, determinisme. Bahayanya adalah judul menjadi lebih besar daripada hasil.

Makalah ini layak dibaca karena menyerang titik tekanan yang nyata. Teori kuantum standar dan relativitas umum tidak menyatu dengan mulus. Korelasi tipe Bell memang mengalahkan penjelasan klasik lokal biasa di ruang-waktu standar. Pengukuran dan waktu tetap sulit secara konseptual. Kerangka yang mengatakan “mungkin asumsi ruang-waktu adalah tempat yang salah untuk memulai” tidak otomatis benar, tetapi mengajukan pertanyaan yang sah.

Langkah yang menarik bukan nostalgia terhadap fisika klasik lama. Yang menarik adalah harga untuk membuat gambaran klasik bekerja: kausalitas ruang-waktu biasa tidak lagi menjadi seluruh arena kausal. Harga konseptual untuk mempertahankan realisme dan determinisme adalah penambahan dinamika tau yang tidak dapat diakses langsung oleh pengamat.

Apakah harga itu dapat diterima adalah pertanyaan fisika, bukan slogan. Prediksi makalah sendiri menunjukkan di mana pertanyaan itu dapat diuji secara fisik.

Singkatnya

Filip Strubbe mengusulkan kerangka klasik lima dimensi di mana ruang-waktu empat dimensi biasa berevolusi di bawah parameter tambahan, τ . Pada kesetimbangan, kerangka memulihkan gravitasi Newton dalam batas gravitasi lemah dan bertujuan memulihkan struktur dasar relativitas umum di luarnya. Kerangka juga memodelkan dua fenomena kuantum: korelasi tipe EPR melalui pengaruh yang merambat sepanjang garis dunia dalam τ , dan interferensi celah ganda melalui sekumpulan garis dunia yang kepadatannya berperilaku mirip gelombang sementara satu garis dunia momentum menentukan hasil. Usulan ini bersifat teoretis dan berbasis simulasi. Pentingnya bukan bahwa ia menyelesaikan gravitasi kuantum, melainkan bahwa ia membuat alternatif klasik yang konkret dengan kemungkinan perbedaan eksperimen, termasuk informasi lintasan gravitasi dan ekspektasi negatif untuk beberapa uji keterbelitan yang dimediasi gravitasi.

Penilaian tanpa berlebihan

Apa yang ditunjukkan makalah: Sebuah kerangka klasik 4D + τ yang diusulkan dapat mereproduksi perilaku gravitasi dan mirip-kuantum tertentu dalam model: gravitasi Newton pada kesetimbangan, struktur dasar relativitas umum, korelasi tipe EPR, dan interferensi mirip celah ganda.

Apa yang masuk akal tetapi belum dibuktikan: Bahwa kerangka ini dapat berkembang menjadi jalur alternatif nyata menuju gravitasi kuantum. Makalah memberikan sebuah rute dan prediksi; ia tidak menetapkan bahwa alam mengikutinya.

Apa yang tidak ditunjukkan: Ia tidak menyelesaikan gravitasi kuantum, membantah mekanika kuantum, membantah teorema Bell, atau membuktikan secara eksperimen bahwa gravitasi bersifat klasik. Ia juga tidak menyediakan pengganti lengkap bagi seluruh formalisme kuantum.

Keterbatasan utama bagi pembaca umum: Langkah kunci makalah adalah menambahkan dinamika τ di luar ruang-waktu biasa. Itu mungkin produktif secara fisik, tetapi juga merupakan asumsi yang melakukan sebagian besar pekerjaan. Jangan samakan “klasik di dalam kerangka yang lebih besar” dengan “fisika klasik biasa ternyata benar sejak awal.”

Seberapa besar keyakinan yang sebaiknya dimiliki pembaca umum? Keyakinan sedang bahwa makalah menyajikan konstruksi teoretis yang serius dan eksplisit; keyakinan rendah bahwa ini adalah jawaban akhir. Kesimpulan yang tepat bukan percaya atau menolak, melainkan pertanyaan yang lebih tajam: dapatkah penyimpangan yang diusulkan dari teori kuantum standar dibuat dapat diuji secara eksperimen?

Sumber

Strubbe, A five-dimensional classical framework for gravitational and quantum phenomena, Scientific Reports 16, Article 2965 (2026)

<https://doi.org/10.1038/s41598-025-32860-8>