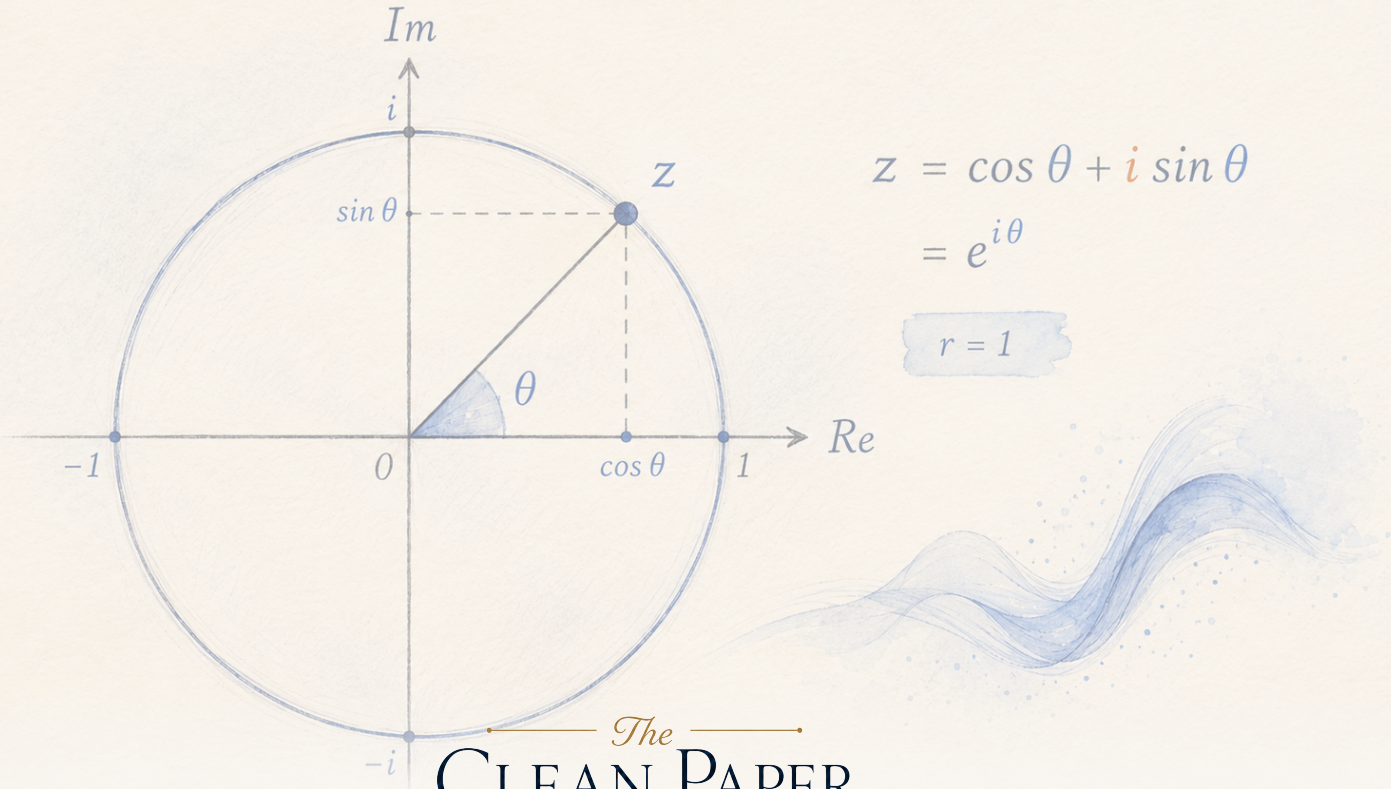


The Clean Paper

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

Mekanika kuantum dapat ditulis hanya dengan bilangan real — masalahnya ada pada cara sistem digabungkan

Pada 2021, sebuah hasil yang banyak diberitakan menyatakan bahwa versi mekanika kuantum berbasis bilangan real dapat dipalsukan secara eksperimen, dan eksperimen lanjutan pada 2022 sesuai dengan teori kuantum kompleks standar. Ini sering diberi judul sebagai bukti bahwa bilangan imajiner secara fisik nyata. Sebuah makalah baru di Physical Review Letters mempertajam klaim itu: jika formulasi berbasis bilangan real dibangun dengan asumsi berbeda yang dapat dipandang lebih fisik tentang cara sistem terpisah digabungkan, formulasi tersebut mereproduksi semua prediksi mekanika kuantum kompleks, termasuk pengujian multipartit. Pembacaan yang jujur adalah bahwa bilangan kompleks sangat praktis, bukan mutlak diperlukan — dan bahwa eksperimen terdahulu menyingkirkan satu teori real tertentu, bukan bilangan real pada prinsipnya. Ini adalah hasil fondasi teoretis, bukan pengukuran baru, dan tidak meminta siapa pun berhenti menggunakan bilangan kompleks.

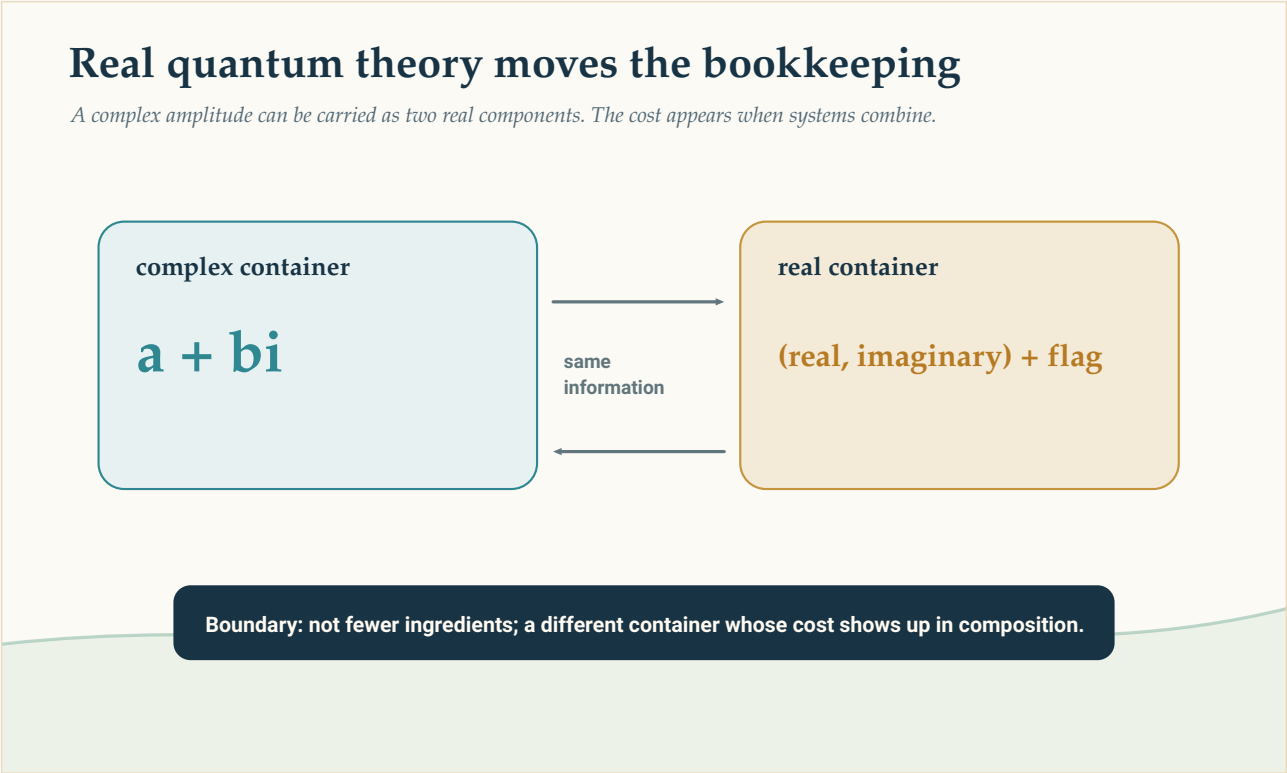
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Quantum Mechanics Based on Real Numbers: A Consistent Description*, Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping, Dagmar Bruss, Physical Review Letters · DOI: 10.1103/4k13-sdjh

Sebuah judul yang patut dibaca ulang

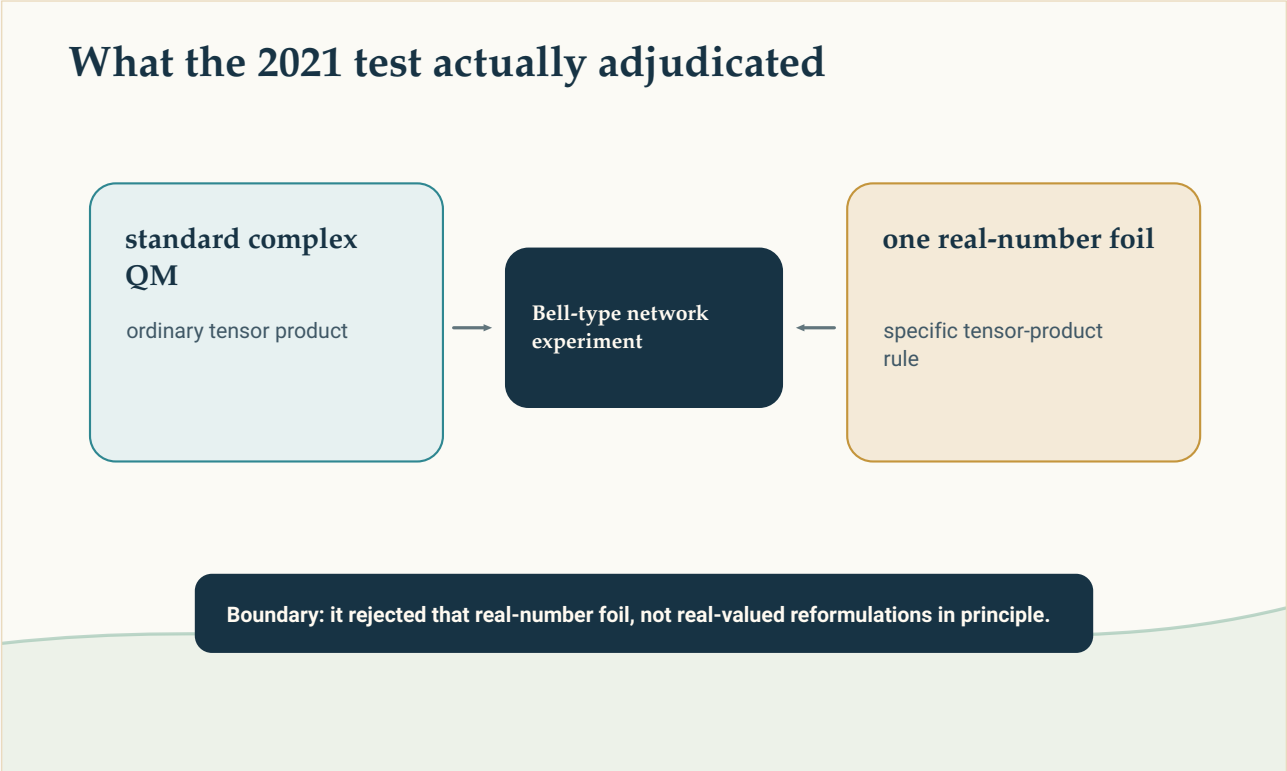
Beberapa tahun lalu, sebuah klaim mencolok beredar luas: eksperimen disebut telah menunjukkan bahwa bilangan imajiner secara fisik nyata, dan bahwa mekanika kuantum tidak dapat ditulis tanpa bilangan tersebut. Klaim itu berangkat dari fisika yang sungguh-sungguh dan dikerjakan dengan cermat — sebuah usulan tahun 2021 di *Nature* oleh Marc-Olivier Renou dan rekan-rekannya, serta eksperimen pada 2022 yang melaksanakannya. Namun versi populer memadatkan pernyataan yang sangat spesifik menjadi slogan, dan slogannya lebih kuat daripada hasil sebenarnya.

Sebuah makalah baru di *Physical Review Letters* oleh Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping, dan Dagmar Bruß mengembalikan pernyataan itu ke bentuk yang tepat. Mereka membangun versi mekanika kuantum yang hanya menggunakan bilangan real dan mereproduksi setiap prediksi teori kompleks standar — termasuk eksperimen multipartit yang sebelumnya dikatakan menyingkirkan bilangan real. Triknya bukan menyelundupkan bilangan imajiner kembali ke dalam teori. Yang diubah adalah satu asumsi tentang bagaimana sistem-sistem terpisah digabungkan. Kesimpulan yang jujur, dengan kata-kata para penulis sendiri, adalah bahwa bilangan kompleks tidak diperlukan untuk mendeskripsikan mekanika kuantum, tetapi jelas sangat berguna.



Amplitudo kompleks a+bi adalah sepasang bilangan real dengan sebuah “penanda” yang dibawa bersama setiap sistem. Formulasi real tidak memakai lebih sedikit unsur — hanya wadah yang berbeda, dengan biayanya muncul pada cara sistem digabungkan.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Eksperimen 2021–22 membandingkan dua teori tertentu — mekanika kuantum kompleks standar melawan teori real "pembanding" yang mempertahankan aturan produk tensor — dan hasilnya mendukung teori kompleks. Yang disingkirkan adalah teori pembanding itu, bukan bilangan real pada prinsipnya.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Apa peran bilangan kompleks dalam teori

Dalam mekanika kuantum, keadaan suatu sistem dideskripsikan dengan amplitudo, dan untuk memperoleh probabilitas sebuah hasil kita mengambil kuadrat besar amplitudo tersebut. Dalam teori standar, amplitudo itu berupa bilangan kompleks: masing-masing membawa besar dan fase, yaitu sebuah sudut. Fase bukan hiasan. Ketika dua jalur menuju hasil yang sama bergabung, fase menentukan apakah keduanya saling memperkuat atau meniadakan — interferensi yang menjadi ciri perilaku kuantum. Sebaliknya, fase keseluruhan yang dimiliki bersama oleh seluruh sistem tidak pernah dapat diukur.

Sebuah bilangan kompleks pada dasarnya adalah sepasang bilangan real — bagian real dan bagian imajiner — yang digabungkan dengan aturan tertentu tentang bagaimana keduanya dikalikan. Maka pertanyaan alaminya adalah apakah pengemasan itu benar-benar esensial. Bisakah dua bilangan real tersebut dipertahankan, kemasan kompleks dibuang, dan seluruh mekanika kuantum tetap diperoleh? Aturan perkalianlah yang membuat bilangan kompleks lebih dari sekadar dua bilangan berdampingan, sehingga jawabannya tidak jelas — dan di situlah letak kehalusannya.

Apa yang sebenarnya ditetapkan oleh hasil 2021

Renou dan rekan-rekannya mengajukan persis pertanyaan itu dan memberinya bentuk yang tajam serta dapat diuji. Mereka tidak bertanya apakah bilangan real dapat muncul di suatu tempat dalam teori kuantum; mereka bertanya apakah formulasi berbasis bilangan real dapat menyamai semua prediksi teori kompleks jika diberi aturan tertentu untuk menggabungkan sistem. Aturan itu — sebut saja aturan produk tensor — adalah resep standar untuk mendeskripsikan beberapa bagian independen sebagai satu keseluruhan.

Dengan aturan tersebut, mereka menemukan skenario dengan tiga pihak yang berbagi keterikatan kuantum dari dua sumber independen, di mana teori bilangan real dan teori kompleks memprediksi korelasi terukur yang berbeda — versi multipartit dari uji Bell. Pada 2022, eksperimen menggunakan sirkuit superkonduktor dan foton melakukan pengujian semacam itu. Korelasi yang diukur sesuai dengan mekanika kuantum kompleks dan tidak sesuai dengan alternatif real tersebut.

> **Mengapa pengujian membutuhkan dua sumber, bukan satu**
>
> Uji Bell biasa menggunakan satu sumber yang mengirimkan satu pasangan terbelit kepada dua orang, Alice dan Bob. Untuk susunan itu, mekanika kuantum berbasis bilangan real dapat mereproduksi persis korelasi yang sama seperti teori kompleks — keduanya tidak dapat dibedakan, sehingga satu sumber tidak bisa memutuskan di antara keduanya.
> Argumen 2021 memperoleh daya pembeda dengan menambahkan sumber kedua yang **independen**. Bayangkan tiga pihak dalam satu garis: Alice, Bob, Charlie. Satu sumber mengaitkan Alice dengan Bob; sumber terpisah, yang tidak berbagi masa lalu bersama, mengaitkan Bob dengan Charlie. Bob berada di tengah dan mengukur dua partikelnya bersama-sama, sehingga menghubungkan kedua bagian. Justru *independensi* kedua sumber — asumsi bahwa keduanya dipersiapkan secara terpisah — yang melakukan pekerjaan penting: dengan aturan produk tensor standar untuk menggabungkan sistem independen, teori bilangan real tidak dapat menyamai korelasi tiga arah yang diprediksi mekanika kuantum kompleks untuk jaringan ini, sedangkan pengujian dengan satu sumber membuat kedua teori tetap seri. Celah itulah yang diukur eksperimen.

Itu adalah hasil yang nyata dan bersih. Namun perhatikan dengan saksama apa yang dibandingkan: teori kuantum kompleks standar melawan satu teori real tertentu — teori yang mempertahankan aturan produk tensor biasa. Pasangan itulah, bukan bilangan real sebagai konsep, yang diuji oleh eksperimen. Makalah baru, meminjam istilah dari fondasi kuantum, menyebut alternatif yang telah disingkirkan itu sebagaimana adanya: sebuah *foil theory* — teori yang tidak diajukan siapa pun sebagai kebenaran, tetapi sengaja dibuat sebagai pembanding terhadap teori yang diterima agar eksperimen dapat membedakan keduanya. Nilainya justru karena dapat dibedakan: menyingkirkan teori pembanding menunjukkan asumsi mana dalam teori real yang benar-benar melakukan pekerjaan.

Apa yang diubah oleh makalah baru

Karya baru ini mempertahankan hampir semuanya dan hanya mengubah satu postulat. Alih-alih mengasumsikan aturan produk tensor untuk menggabungkan sistem, para penulis memulai dari syarat lokalitas yang mereka anggap lebih mendasar secara fisik: operasi yang dilakukan hanya pada satu subsistem seharusnya tidak menimbulkan efek terukur pada subsistem lain yang tidak disentuh.

Dari titik awal itu mereka membangun mekanika kuantum berbasis bilangan real secara eksplisit. Bagian real dan imajiner dari amplitudo biasa dibawa sebagai pencatatan tambahan berupa bilangan real — makalah menyebutnya sebuah "penanda" yang melekat pada setiap sistem — dan fase global yang tak teramati dalam teori kompleks berubah menjadi rotasi yang sama-sama tak teramati dalam teori real. Biayanya muncul tepat di tempat yang ditunjukkan hasil 2021: pada cara sistem digabungkan. Cara naif untuk menyatukan deskripsi real ini bahkan tidak menghasilkan resep yang terdefinisi dengan baik, sehingga konstruksi tersebut mengelompokkan deskripsi-deskripsi yang mewakili fisika yang sama dan bekerja dengan kelas-kelas itu. Dengan aturan penggabungan tersebut, teori real mereproduksi setiap nilai harapan yang diprediksi teori kompleks — untuk satu sistem maupun banyak sistem yang terbelit dan terpisah. Para penulis juga menunjukkan bahwa konstruksi itu pada dasarnya unik dan ekuivalen dengan mekanika kuantum standar.

Karena itu, eksperimen multipartit tidak dapat membedakan teori real ini dari teori kompleks, sebab keduanya sepakat pada semua prediksi. Eksperimen terdahulu tidak gagal; eksperimen itu hanya menguji teori real yang berbeda dan lebih restriktif.

Mengapa ini bukan kontradiksi

Mudah untuk membaca hasil ini sebagai "eksperimen 2021 salah." Justru sebaliknya. Eksperimennya benar, dan makalah ini bergantung pada kebenaran itu: semua korelasi terukur diterima, lalu ditunjukkan sebuah formulasi real yang juga menghasilkannya. Yang direvisi adalah interpretasinya — lompatan dari "teori real ini telah dipalsukan" menjadi "bilangan real mustahil dalam mekanika kuantum." Lompatan itu melewati asumsi yang sebenarnya bekerja.

Makalah ini juga tidak berargumen bahwa kita harus meninggalkan bilangan kompleks. Ringkasannya sendiri berhati-hati di kedua sisi: bilangan kompleks tidak mutlak diperlukan, dan bilangan tersebut sangat berguna. Konstruksi real membutuhkan penanda tambahan pada setiap sistem dan aturan penggabungan yang lebih rumit; bilangan kompleks membungkus semuanya dalam satu aritmetika yang bersih. Kemudahan bukan hal sepele. Dalam fisika, sering kali itulah alasan utama suatu formalisme menang.

Mengapa ini penting

Pertanyaan menarik di balik semuanya adalah apa arti kata “perlu” dalam sebuah teori fisika. Eksperimen dapat membedakan dua teori ketika keduanya membuat prediksi yang berbeda. Namun eksperimen sendirian tidak dapat memberi tahu bahwa suatu unsur matematika tertentu adalah satu-satunya wadah yang mungkin untuk sekumpulan prediksi — itu adalah pertanyaan tentang teori apa saja yang dapat dibangun, dan dijawab melalui konstruksi, bukan pengukuran. Makalah ini adalah sebuah konstruksi: ia menunjukkan alternatif yang sebelumnya dianggap telah disingkirkan eksperimen.

Hasil ini juga mempertajam perbedaan yang layak dipertahankan secara umum. “Teori ini telah dipalsukan” dan “alat matematika ini tidak dapat dihindari” adalah dua pernyataan berbeda, dan celah di antara keduanya adalah tempat hasil eksperimen yang bersih dapat berubah menjadi klaim berlebihan. Bilangan kompleks tetap merupakan bahasa mekanika kuantum yang alami dan efisien. Apakah bilangan itu diperlukan secara metafisik adalah pertanyaan lain, dan untuk saat ini jawabannya adalah tidak.

Singkatnya

Sebuah usulan 2021 dan eksperimen 2022 menunjukkan bahwa mekanika kuantum berbasis bilangan real yang dibangun dengan aturan produk tensor standar untuk menggabungkan sistem menghasilkan prediksi yang berbeda dan dapat diuji dibandingkan mekanika kuantum kompleks, dan eksperimen mendukung teori kompleks. Hasil ini banyak diberitakan sebagai bukti bahwa bilangan imajiner secara fisik diperlukan. Makalah baru di *Physical Review Letters* membangun mekanika kuantum berbasis bilangan real dengan postulat berbeda yang didasarkan pada lokalitas dan mereproduksi semua prediksi teori kompleks, termasuk pengujian multipartit — sehingga bilangan kompleks tampak sebagai pilihan yang sangat praktis, bukan kebutuhan mutlak. Ini adalah konstruksi teoretis, tidak membatalkan eksperimen terdahulu, dan tidak meminta mekanika kuantum diformulasikan ulang dalam praktik.

Penilaian tanpa berlebihan

Apa yang ditunjukkan makalah: Bahwa formulasi mekanika kuantum yang konsisten dan hanya menggunakan bilangan real dapat mereproduksi setiap prediksi teori kompleks standar, termasuk eksperimen tipe Bell multipartit, jika dibangun dari postulat lokalitas alih-alih aturan produk tensor untuk menggabungkan sistem.

Apa yang masuk akal tetapi bukan intinya: Bahwa hasil ini “membantah” temuan 2021–2022. Tidak. Makalah menerima eksperimen tersebut sebagai benar dan menafsirkan ulang cakupannya: eksperimen menyingkirkan satu teori real tertentu yang mempertahankan aturan produk tensor, bukan bilangan real pada prinsipnya.

Apa yang tidak ditunjukkan: Bahwa bilangan kompleks salah, tidak berguna, atau layak ditinggalkan dalam praktik — makalah secara eksplisit menyebutnya sangat berguna. Ini juga bukan eksperimen baru: tidak ada data baru yang diukur; klaimnya berupa konstruksi matematika dan pembuktian konsistensi.

Keterbatasan utama bagi pembaca umum: Argumennya bergantung pada asumsi mana yang dianggap lebih mendasar secara fisik — aturan produk tensor atau postulat lokalitas. Itu adalah pilihan beralasan dalam perdebatan fondasi yang masih berlangsung, bukan fakta yang ditetapkan pengukuran, dan konstruksi berbasis bilangan real bisa dipandang kurang alami daripada formulasi kompleks yang disamainya.

Seberapa besar kepercayaan yang layak dimiliki pembaca umum? Tinggi bahwa konstruksinya konsisten secara matematika — karya ini telah ditinjau sejawat, dan logikanya dapat diperiksa. Kesimpulan yang patut dipercaya adalah yang sederhana: bilangan kompleks adalah bahasa mekanika kuantum yang nyaman, bukan kebutuhan metafisik yang telah terbukti. Perlakukan judul seperti "bilangan imajiner itu nyata" sebagai slogan yang justru ingin dikoreksi oleh makalah ini.

Sumber

P. Barrios Hita, A. Trushechkin, H. Kampermann, M. Epping and D. Bruss, Physical Review Letters 136, 240202 (2026), DOI 10.1103/4k13-sdjh
https://doi.org/10.1103/4k13-sdjh