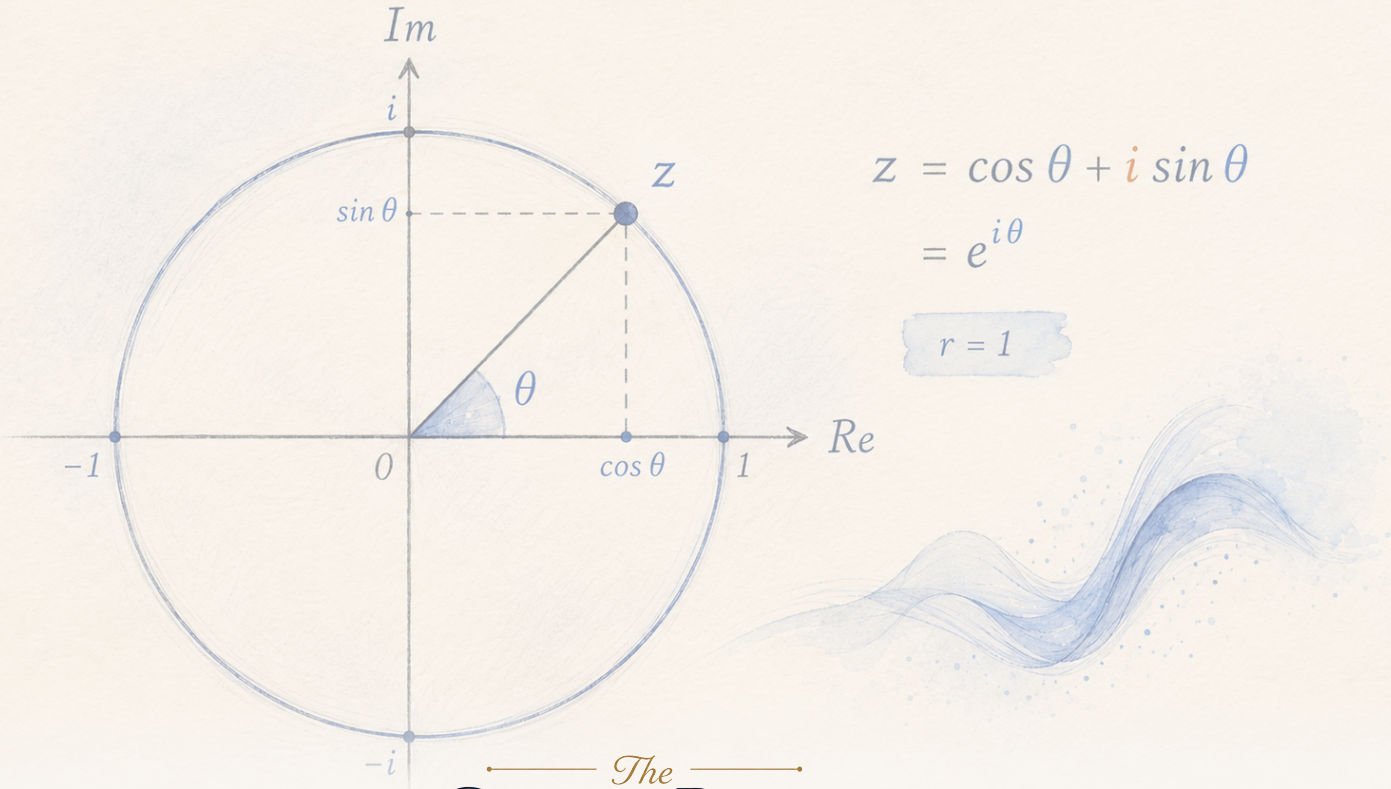


The Clean Paper

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

Mekanik kuantum boleh ditulis dengan nombor nyata sahaja — masalahnya terletak pada cara sistem digabungkan

Pada 2021 satu hasil yang dilaporkan secara meluas berhujah bahawa versi nombor nyata mekanik kuantum boleh dipalsukan secara eksperimen, dan eksperimen susulan pada 2022 bersetuju dengan teori kuantum kompleks standard. Itu sering dijadikan tajuk bahawa nombor khayalan benar-benar nyata secara fizikal. Satu kertas baharu dalam Physical Review Letters menajamkan dakwaan tersebut: bina rumusan nombor nyata atas andaian berbeza, yang boleh dihujahkan lebih fizikal, tentang cara sistem terpisah digabungkan, dan ia menghasilkan semula setiap ramalan mekanik kuantum kompleks, termasuk ujian berbilang pihak. Bacaan jujur ialah nombor kompleks mudah digunakan dan bukannya mutlak diperlukan — dan eksperimen terdahulu menolak satu teori nyata tertentu, bukan nombor nyata pada prinsipnya. Ini hasil asas teori di atas kertas, bukan pengukuran baharu, dan ia tidak meminta sesiapa berhenti menggunakan nombor kompleks.

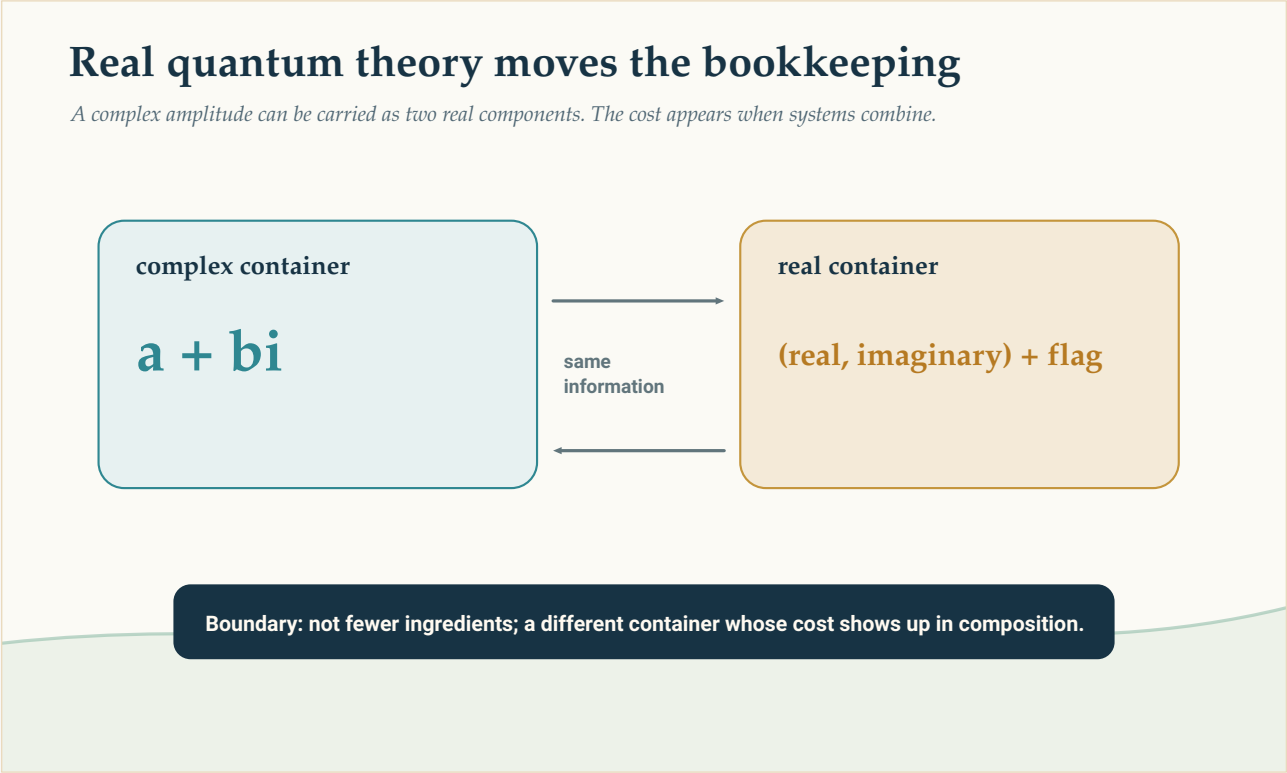
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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

Tajuk berita yang patut dibaca semula

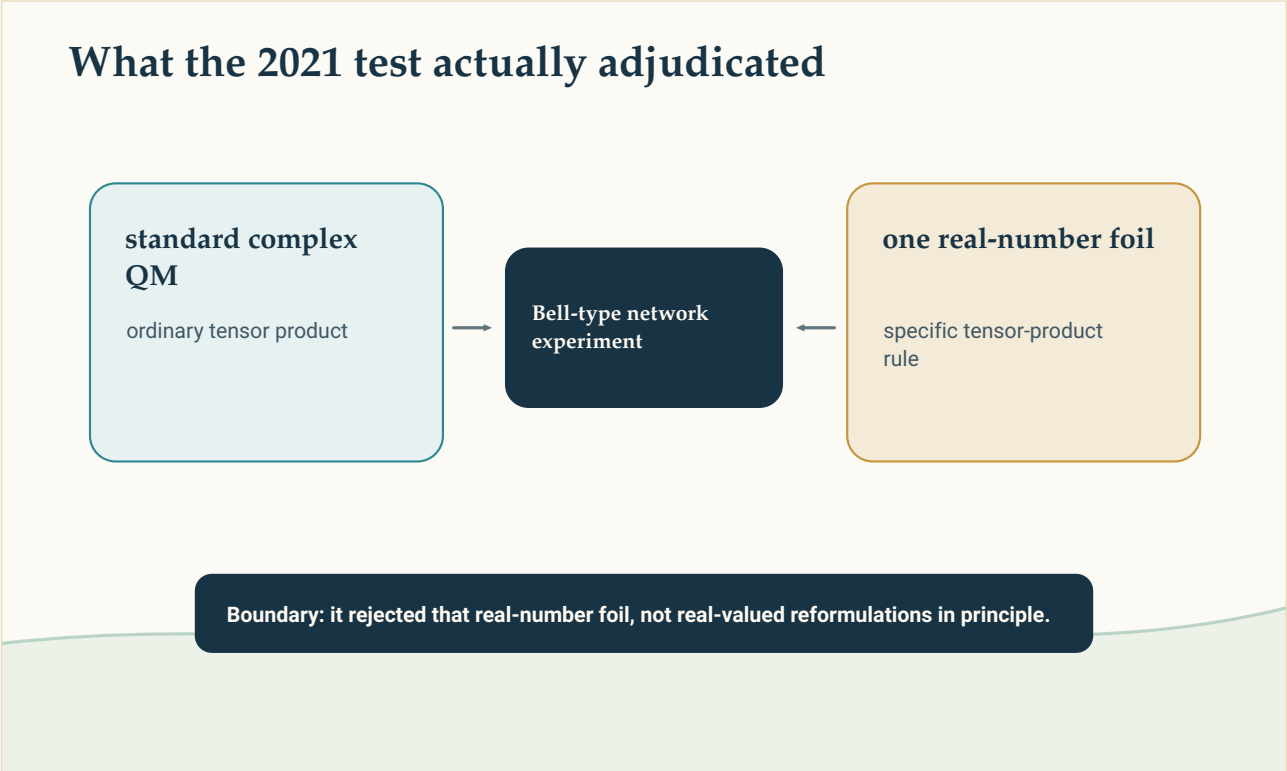
Beberapa tahun lalu, satu dakwaan menarik tersebar luas: eksperimen telah menunjukkan bahawa nombor khayalan itu nyata secara fizikal, bahawa mekanik kuantum tidak boleh ditulis tanpanya. Dakwaan itu lahir daripada fizik yang benar-benar teliti — satu cadangan tahun 2021 dalam *Nature* oleh Marc-Olivier Renou dan rakan-rakan, serta eksperimen pada 2022 yang melaksanakannya. Tetapi versi popular memampatkan kenyataan yang tepat menjadi slogan, dan slogannya lebih kuat daripada hasil sebenar.

Satu kertas baharu dalam *Physical Review Letters* oleh Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping dan Dagmar Bruß mengembalikan kenyataan yang tepat itu. Ia membina versi mekanik kuantum yang hanya menggunakan nombor nyata dan menghasilkan semula setiap ramalan teori kompleks piawai — termasuk eksperimen berbilang pihak yang pernah dikatakan menyingkirkan nombor nyata. Helahnya bukan menyeludup nombor khayalan kembali masuk. Ia mengubah satu andaian tentang cara sistem berasingan digabungkan. Kesimpulan jujur, menurut kata-kata para penulis sendiri, ialah nombor kompleks tidak diperlukan untuk menerangkan mekanik kuantum, tetapi sudah tentu sangat berguna.



Amplitud kompleks a+bi ialah sepasang nombor nyata dengan satu “bendera” dibawa bersama setiap sistem. Rumusan nyata bukan menggunakan lebih sedikit bahan — hanya bekas yang berbeza, dengan kos muncul pada cara sistem digabungkan.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Eksperimen 2021–22 membandingkan dua teori khusus — mekanik kuantum kompleks piawai dengan satu teori "foil" nyata yang mengekalkan peraturan hasil darab tensor — dan hasilnya memihak kepada teori kompleks. Ia menolak teori foil itu, bukan nombor nyata pada prinsipnya.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Apa yang dilakukan oleh nombor kompleks dalam teori

Dalam mekanik kuantum, keadaan sesuatu sistem diterangkan oleh amplitud, dan untuk mendapatkan kebarangkalian sesuatu hasil anda mengambil kuasa dua magnitud amplitud. Dalam teori piawai amplitud itu ialah nombor kompleks: setiap satu membawa magnitud dan fasa, iaitu satu sudut. Fasa itu bukan hiasan. Apabila dua laluan menuju hasil yang sama bergabung, fasa menentukan sama ada ia saling menguatkan atau membatalkan — interferens yang menjadi ciri tingkah laku kuantum. Sebaliknya, satu fasa keseluruhan yang dikongsi oleh seluruh sistem tidak pernah boleh diukur.

Satu nombor kompleks sebenarnya hanyalah sepasang nombor nyata — bahagian nyata dan bahagian khayalan — yang dibungkus bersama peraturan tertentu tentang cara ia didarab. Jadi soalan semula jadi ialah sama ada pembungkusan itu penting. Bolehkah kita mengekalkan dua nombor nyata, membuang pembungkusan kompleks, dan masih mempunyai seluruh mekanik kuantum? Peraturan pendarabanlah yang menjadikan nombor kompleks lebih daripada dua nombor yang diletakkan bersebelahan, jadi jawapannya tidak jelas, dan di situlah kerumitannya.

Apa yang sebenarnya ditetapkan oleh hasil 2021

Renou dan rakan-rakan bertanya soalan itu dengan tepat, lalu memberinya bentuk yang tajam dan boleh diuji. Mereka bukan bertanya sama ada nombor nyata boleh muncul di mana-mana dalam teori kuantum; mereka bertanya sama ada rumusan nombor nyata boleh memadankan semua ramalan teori kompleks dengan satu peraturan tertentu untuk menggabungkan sistem. Aturan itu — sebut sahaja peraturan hasil darab tensor — ialah preskripsi piawai untuk menerangkan beberapa bahagian bebas sebagai satu keseluruhan.

Di bawah peraturan tersebut, mereka menemui senario tiga pihak yang berkongsi keterikatan daripada dua sumber bebas di mana teori nombor nyata dan teori kompleks meramalkan korelasi terukur yang berbeza — versi berbilang pihak bagi ujian Bell. Pada 2022, eksperimen menggunakan litar superkonduktor dan foton menjalankan ujian sebegitu. Korelasi yang diukur sepadan dengan mekanik kuantum kompleks dan tidak konsisten dengan alternatif nyata tersebut.

> **Mengapa ujian memerlukan dua sumber, bukan satu**
>
> Ujian Bell biasa menggunakan satu sumber yang menghantar sepasang zarah terikat kepada dua orang, Alice dan Bob. Untuk susunan itu, mekanik kuantum nombor nyata boleh menghasilkan semula tepat korelasi yang sama seperti teori kompleks — kedua-duanya tidak dapat dibezakan, jadi satu sumber tidak boleh memilih antara mereka.
> Hujah 2021 mendapat kuasanya dengan menambah sumber kedua yang **bebas**. Bayangkan tiga pihak dalam satu garis: Alice, Bob, Charlie. Satu sumber mengikat Alice dengan Bob; sumber berasingan yang tidak berkongsi sejarah bersama mengikat Bob dengan Charlie. Bob berada di tengah dan mengukur kedua-dua zarahnya bersama-sama, menghubungkan dua bahagian tersebut. *Kebebasan* dua sumber itu — andaian bahawa kedua-duanya disediakan secara berasingan — yang melakukan kerja: di bawah peraturan hasil darab tensor piawai untuk menggabungkan sistem bebas, teori nombor nyata tidak dapat memadankan korelasi tiga hala yang diramalkan mekanik kuantum kompleks bagi rangkaian ini, manakala ujian satu sumber meninggalkan kedua-dua teori terikat seri. Jurang itulah yang diukur oleh eksperimen.

Itu hasil yang nyata dan bersih. Tetapi perhatikan dengan teliti apa yang dibandingkannya: teori kuantum kompleks piawai dengan satu teori nyata khusus — yang mengekalkan peraturan hasil darab tensor biasa. Pasangan itulah, bukan nombor nyata sebagai konsep, yang diputuskan oleh eksperimen. Kertas baharu, meminjam istilah daripada asas kuantum, menamakan alternatif yang ditolak itu mengikut sifat sebenarnya: *teori foil* — teori yang tiada siapa ajukan sebagai benar, dibina sengaja sebagai kontras kepada teori yang diterima supaya eksperimen boleh membezakan keduanya. Nilainya memang terletak pada kebolehbezannya: menolak foil menunjukkan andaian mana dalam teori nyata itu yang sebenarnya melakukan kerja.

Apa yang diubah oleh kertas baharu

Kerja baharu mengekalkan hampir semuanya dan mengubah satu postulat. Daripada mengandaikan peraturan hasil darab tensor untuk menggabungkan sistem, ia bermula dengan syarat lokaliti yang menurut para penulis lebih asas secara fizikal: operasi yang dilakukan pada satu subsistem sahaja tidak sepatutnya memberi kesan terukur pada subsistem lain yang tidak disentuh.

Daripada titik mula itu mereka membina mekanik kuantum nombor nyata secara eksplisit. Bahagian nyata dan khayalan amplitud biasa dibawa sebagai pembukuan nyata tambahan — kertas itu memanggilnya "bendera" yang dilekatkan pada setiap sistem — dan fasa global teori kompleks yang tidak boleh diperhatikan bertukar menjadi putaran yang sama tidak boleh diperhatikan dalam teori nyata. Kos muncul tepat di tempat hasil 2021 menemuinya: pada cara sistem digabungkan. Cara naif untuk melekatkan penerangan nyata ini bersama-sama malah tidak menghasilkan resipi yang terdefinisi dengan baik, jadi pembinaan itu sebaliknya mengelompokkan penerangan yang mewakili fizik yang sama dan bekerja dengan kelas-kelas tersebut. Dengan aturan penggabungan itu, teori nyata menghasilkan semula setiap nilai jangkaan yang diramalkan teori kompleks — untuk satu sistem dan untuk banyak sistem, termasuk yang terikat merentasi pihak terpisah. Para penulis juga menunjukkan bahawa pembinaan ini pada asasnya unik dan setara dengan mekanik kuantum piawai.

Jadi eksperimen berbilang pihak tidak dapat membezakan teori nyata ini daripada teori kompleks, kerana kedua-duanya bersetuju pada setiap ramalan. Eksperimen terdahulu tidak gagal; ia cuma menguji teori nyata yang berbeza dan lebih terhad.

Mengapa ini bukan percanggahan

Mudah untuk membaca ini sebagai "eksperimen 2021 salah." Yang benar ialah sebaliknya. Eksperimen itu betul, dan kertas ini bergantung pada ketepatannya: ia menerima setiap korelasi terukur dan menunjukkan rumusan nyata yang turut menghasilkannya. Yang disemak ialah tafsirannya — lompatan daripada "teori nyata ini telah dipalsukan" kepada "nombor nyata mustahil dalam mekanik kuantum." Lompatan itu melangkau andaian yang melakukan kerja.

Kertas itu juga tidak berhujah bahawa sesiapa patut meninggalkan nombor kompleks. Ringkasannya sendiri berhati-hati di kedua-dua arah: nombor kompleks tidak perlu secara ketat, dan ia sangat berguna. Pembinaan nyata memerlukan bendera tambahan pada setiap sistem dan kaedah yang lebih halus untuk menggabungkannya; nombor kompleks membungkus semua itu dalam satu aritmetik yang kemas. Kemudahan bukan perkara kecil. Dalam fizik, ia sering menjadi seluruh sebab sesuatu formalisme menang.

Mengapa ia penting

Soalan menarik di bawah semua ini ialah apakah makna “perlu” bagi teori fizikal. Eksperimen boleh membezakan dua teori apabila ramalannya berbeza. Ia tidak boleh, dengan sendirinya, memberitahu anda bahawa satu bahan matematik tertentu ialah satu-satunya bekas yang mungkin untuk satu set ramalan — itu soalan tentang teori apa yang boleh wujud, dan ia diselesaikan dengan pembinaan, bukan pengukuran. Kertas ini ialah pembinaan: ia menunjukkan alternatif yang sebelum ini dianggap telah disingkirkan oleh eksperimen.

Hasil ini juga menajamkan satu perbezaan yang patut dikekalkan secara umum. “Teori ini dipalsukan” dan “alat matematik ini tidak dapat dielakkan” ialah dua kenyataan berbeza, dan jurang antara keduanya tepat tempat hasil eksperimen yang bersih boleh berubah menjadi dakwaan berlebihan. Nombor kompleks kekal bahasa semula jadi dan cekap bagi mekanik kuantum. Sama ada ia diperlukan secara metafizik ialah soalan berasingan, dan untuk soalan itu jawapannya, buat masa ini, tidak.

Ringkasan utama

Satu cadangan 2021 dan eksperimen pada 2022 menunjukkan bahawa mekanik kuantum nombor nyata yang dibina atas peraturan hasil darab tensor piawai bagi menggabungkan sistem membuat ramalan boleh diuji yang berbeza daripada mekanik kuantum kompleks, dan eksperimen memihak kepada teori kompleks. Ini dilaporkan secara meluas sebagai bukti bahawa nombor khayalan diperlukan secara fizikal. Kertas baharu dalam *Physical Review Letters* membina mekanik kuantum nombor nyata berasaskan postulat lokaliti yang berbeza dan menghasilkan semula semua ramalan teori kompleks, termasuk ujian berbilang pihak — menunjukkan bahawa nombor kompleks lebih kepada kemudahan daripada keperluan mutlak. Ia pembinaan teori, tidak membatalkan eksperimen terdahulu, dan tidak meminta mekanik kuantum dirumus semula dalam amalan.

Semakan tanpa gembar-gembur

Apa yang ditunjukkan oleh kertas ini: Bahawa satu rumusan mekanik kuantum yang konsisten menggunakan hanya nombor nyata boleh menghasilkan semula setiap ramalan teori kompleks piawai, termasuk eksperimen jenis Bell berbilang pihak, jika ia dibina atas postulat lokaliti dan bukannya peraturan hasil darab tensor untuk menggabungkan sistem.

Apa yang munasabah tetapi bukan intinya: Bahawa ini “menyangkal” hasil 2021–2022. Tidak. Ia menerima eksperimen itu sebagai betul dan mentafsir semula skopnya: eksperimen tersebut menolak satu teori nyata khusus, yang mengekalkan peraturan hasil darab tensor, bukan nombor nyata pada prinsipnya.

Apa yang tidak ditunjukkannya: Bahawa nombor kompleks salah, tidak berguna atau patut dibuang

dalam amalan — kertas itu secara jelas menyebutnya sangat berguna. Ini juga bukan eksperimen baharu: tiada data diukur; dakwaannya ialah pembinaan matematik dan bukti kekonsistenan.

had utama untuk pembaca umum: Hujah bergantung pada andaian mana yang dianggap lebih asas secara fizikal — peraturan hasil darab tensor atau postulat lokaliti. Itu pilihan beralasan dalam perdebatan asas yang masih berjalan, bukan fakta yang ditetapkan oleh pengukuran, dan pembinaan nombor nyata boleh dianggap kurang semula jadi daripada pembinaan kompleks yang dipadankannya.

Sejauh mana pembaca umum patut yakin? Tinggi bahawa pembinaan itu konsisten secara matematik — ia telah disemak rakan sebaya, dan logiknya boleh diperiksa. Inti sederhana yang patut dipercayai: nombor kompleks ialah bahasa yang mudah bagi mekanik kuantum, bukan keperluan metafizik yang telah dibuktikan. Anggap tajuk seperti “nombor khayalan itu nyata” sebagai slogan yang kertas ini ditulis untuk betulkan.

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