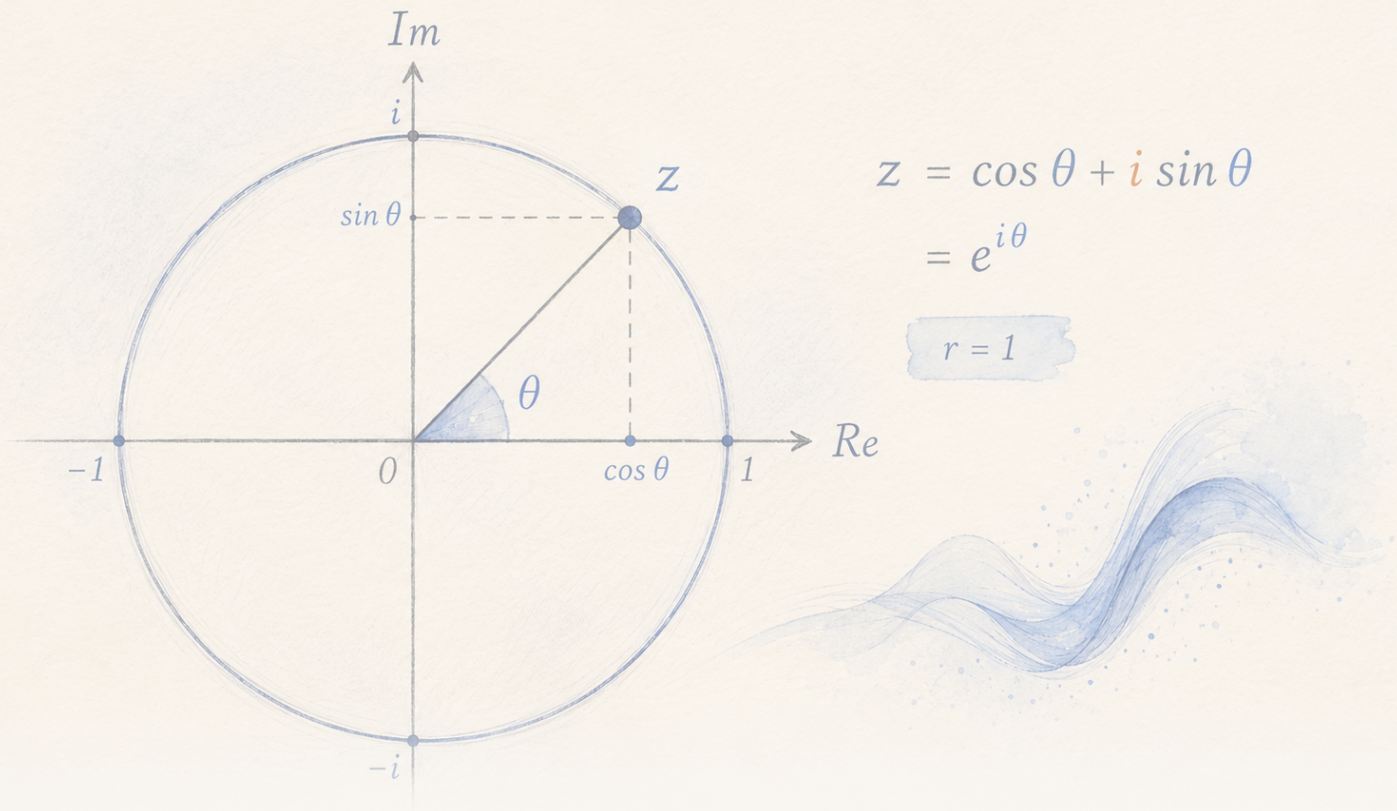




The CLEAN PAPER

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

Kvantovú mechaniku možno zapísať iba reálnymi číslami — háčik je v skladaní systémov

Široko citovaný výsledok z roku 2021 tvrdil, že verziu kvantovej mechaniky založenú na reálnych číslach možno experimentálne vyvrátiť, a experimenty z roku 2022 sa zhodli so štandardnou komplexnou teóriou. Titulky to často opisovali ako dôkaz fyzikálnej skutočnosti imaginárnych čísel. Nová práca v *Physical Review Letters* tvrdenie spresňuje: ak reálna formulácia vyjde z iného, možno fyzikálne prirodzenejšieho predpokladu o skladaní oddelených systémov, reprodukuje každú predpoveď komplexnej kvantovej mechaniky vrátane viacstranných testov. Poctivý záver znie, že komplexné čísla sú pohodlné, ale nie striktne nevyhnutné, a skoršie experimenty vylúčili jednu konkrétnu reálnu teóriu, nie reálne čísla ako také. Ide o výsledok zo základov teórie, nie o nové meranie, a nikoho nevyzýva, aby komplexné čísla opustil.

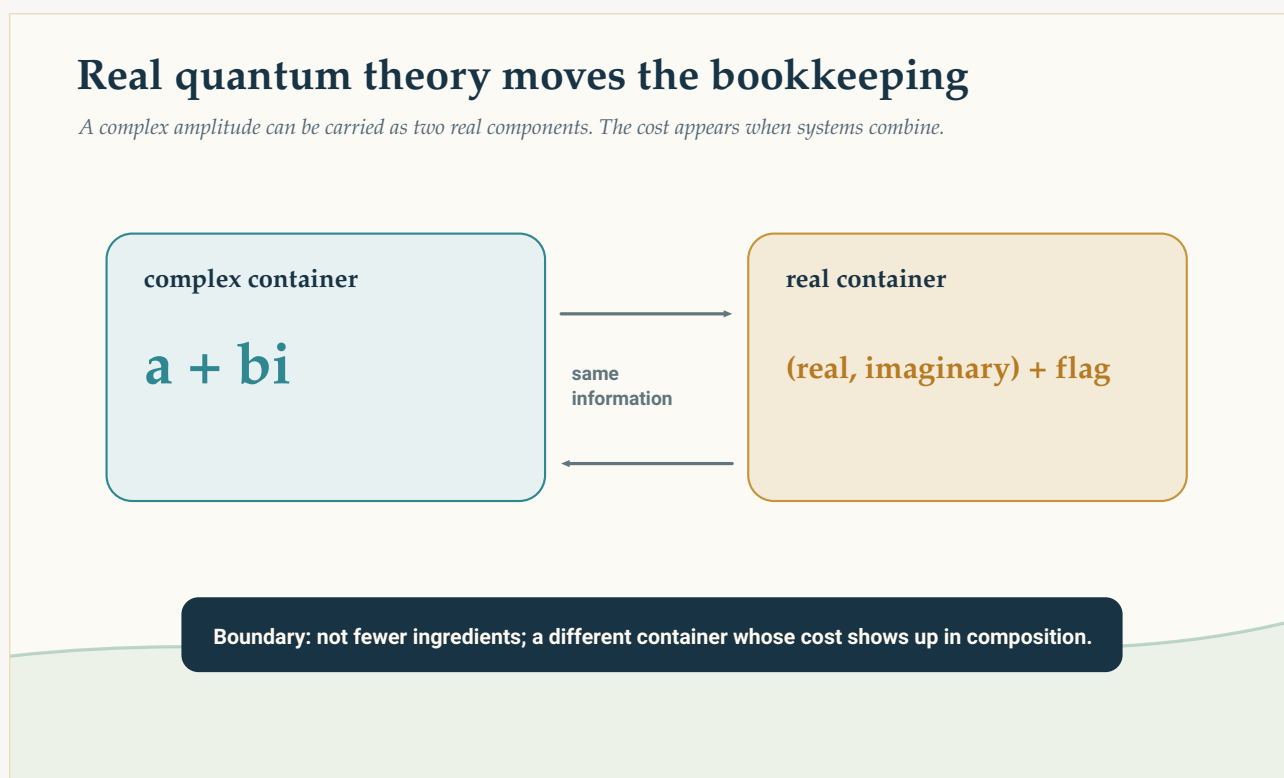
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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

Titulok, ktorý stojí za druhé prečítanie

Pred niekoľkými rokmi sa rozšírilo pozoruhodné tvrdenie: experimenty údajne ukázali, že imaginárne čísla sú fyzikálne skutočné a kvantovú mechaniku bez nich nemožno zapísať. Tvrdenie vyrástlo zo skutočnej, dôkladne vykonanej fyziky — z návrhu Marca-Oliviera Renoua a jeho spolupracovníkov, zverejneného v roku 2021 v časopise *Nature*, a z experimentov z roku 2022, ktoré ho uskutočnili. Populárne podanie však presné tvrdenie stlačilo do sloganu a slogan bol silnejší než samotný výsledok.

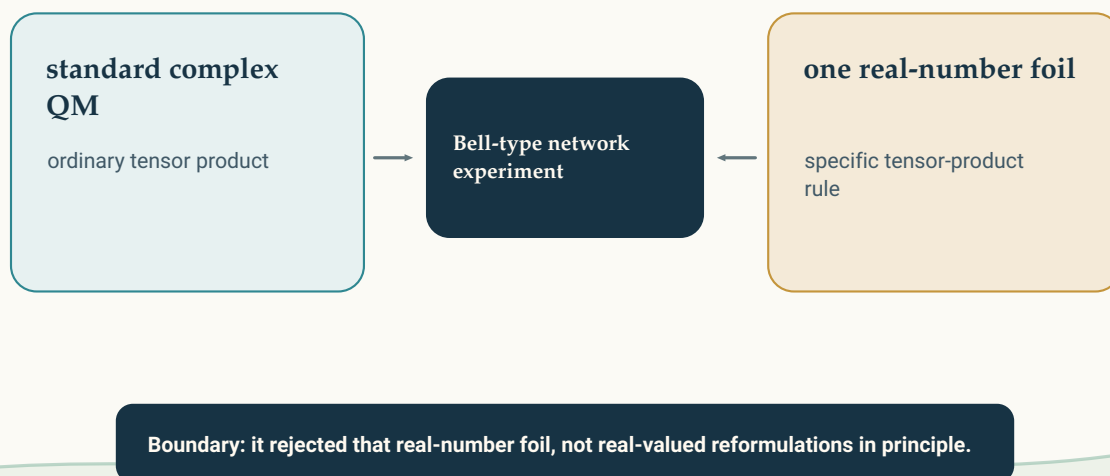
Nová práca Pedra Barriosu Hity, Antona Trushechkina, Hermanna Kampermanna, Michaela Eppinga a Dagmar Bruß v *Physical Review Letters* vracia tvrdeniu jeho presný význam. Konštruje verziu kvantovej mechaniky založenú výlučne na reálnych číslach, ktorá reprodukuje každú predpoveď štandardnej komplexnej teórie — vrátane práve tých viacstranných experimentov, ktoré mali reálne čísla vylučovať. Trik nespočíva v tajnom prepašovaní imaginárnych čísel. Mení sa jediný predpoklad o tom, ako skladať oddelené systémy. Poctivý záver znie slovami autorov takto: komplexné čísla nie sú na opis kvantovej mechaniky nevyhnutné, ale rozhodne sú veľmi užitočné.



Komplexná amplitúda $a+bi$ ako dvojica reálnych čísel s „príznakom“, ktorý sa prenáša s každým systémom. Reálna formulácia nemá menej zložiek — používa len iný obal a jeho cena sa prejaví pri skladaní systémov.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

What the 2021 test actually adjudicated



Experimenty z rokov 2021–2022 porovnali dve konkrétne teórie — štandardnú komplexnú kvantovú mechaniku a reálnu „kontrastnú teóriu“, ktorá zachováva pravidlo tenzorového súčinu — a podporili prvú z nich. Vylúčili túto kontrastnú teóriu, nie reálne čísla ako také.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Čo v teórii robia komplexné čísla

V kvantovej mechanike opisujú stav systému amplitúdy a pravdepodobnosť výsledku získame umocnením absolútnej hodnoty amplitúdy na druhú. V štandardnej teórii sú amplitúdy komplexné čísla: každá má veľkosť a fázu, teda uhol. Fáza nie je ozdoba. Keď sa spoja dve cesty vedúce k rovnakému výsledku, ich fázy určujú, či sa navzájom zosilnia, alebo vyrušia — to je interferencia, charakteristický znak kvantového správania. Spoločnú globálnu fázu celého systému však zmerať nemožno.

Komplexné číslo je vo svojej podstate dvojica reálnych čísel — reálna a imaginárna časť — spojená osobitnými pravidlami násobenia. Prirodzená otázka teda znie, či je toto spojenie nevyhnutné. Možno si ponechať dve reálne čísla, zahodiť komplexný obal a stále získať celú kvantovú mechaniku? Pravidlá násobenia robia z komplexných čísel niečo viac než iba dve čísla položené vedľa seba, takže odpoveď nie je zrejmalá; práve tu sa skrýva tá jemnosť.

Čo výsledok z roku 2021 skutočne preukázal

Renou a jeho spolupracovníci položili presne túto otázku a dali jej ostrú, experimentálne overiteľnú podobu. Nepýtali sa, či sa reálne čísla môžu vôbec objaviť v kvantovej teórii; pýtali sa, či môže reálna formulácia reprodukovat všetky predpovede komplexnej teórie pri určitom pravidle skladania systémov. Toto pravidlo — nazvime ho pravidlom tenzorového súčinu — je štandardný spôsob, ako opísať niekoľko nezávislých častí ako jeden celok.

S týmto pravidlom našli scenár troch strán zdieľajúcich previazanie z dvoch nezávislých zdrojov, v ktorom reálna a komplexná teória predpovedajú odlišné, merateľné korelácie — viacstrannú verziu Bellovho testu. V roku 2022 sa takéto testy uskutočnili pomocou supravodivých obvodov a fotónov. Namerané korelácie zodpovedali komplexnej kvantovej mechanike a boli nezlučiteľné s reálnou alternatívou.

Prečo test potrebuje dva zdroje, nie jeden

Bežný Bellov test používa jediný zdroj, ktorý posiela previazanú dvojicu dvom ľuďom, Alici a Bobovi. Pri takomto usporiadaní dokáže kvantová mechanika založená na reálnych číslach presne reprodukovat rovnaké korelácie ako komplexná teória — obe sú nerozlíšiteľné, takže jediný zdroj medzi nimi nemôže rozhodnúť.

Argument z roku 2021 začne fungovať po pridaní druhého, **nezávislého** zdroja. Predstavte si tri strany v rade: Alicu, Boba a Charlieho. Jeden zdroj previaže Alicu s Bobom; oddelený zdroj, ktorý s prvým nemá spoločnú minulosť, previaže Boba s Charlieom. Bob stojí uprostred a spoločne zmeria svoje dve častice, čím obe polovice prepojí. Rozhodujúca je *nezávislosť* zdrojov — predpoklad, že boli pripravené oddelene: pri štandardnom pravidle tenzorového súčinu pre nezávislé systémy nedokáže reálna teória reprodukovat trojstranné korelácie predpovedané komplexnou kvantovou mechanikou, hoci test s jediným zdrojom necháva obe teórie nerozlíšené. Experimenty merali práve tento rozdiel.

Je to skutočný a prehľadný výsledok. Treba si však presne všimnúť, čo porovnával: štandardnú komplexnú kvantovú teóriu s jednou konkrétnou reálnou teóriou — takou, ktorá zachováva obvyklé pravidlo tenzorového súčinu. Experimenty rozhodovali medzi touto dvojicou, nie proti reálnym číslam ako takým. Nová práca si požičiava pojem zo základov kvantovej teórie a nazýva vylúčenú alternatívu podľa jej úlohy: *kontrastnou teóriou* — teóriou, ktorú nikto nepredkladá ako pravdivú, ale ktorá je zámerne vytvorená ako protiklad prijímanej teórie, aby ich experiment mohol rozlíšiť. Jej hodnota spočíva práve v tejto rozlíšiteľnosti: vylúčenie kontrastnej teórie ukazuje, ktoré predpoklady reálnej teórie niesli hlavnú dôkaznú záťaž.

Čo nová práca mení

Nová práca zachováva takmer všetko a mení jediný postulát. Namiesto pravidla tenzorového súčinu pri skladaní systémov vychádza z požiadavky lokálnosti, ktorú autori považujú za fyzikálne základ-

nejšiu: operácia vykonaná iba na jednom podsysteme by nemala mať merateľný vplyv na iný, nedotknutý podsystem.

Na tomto základe výslovne konštruujú kvantovú mechaniku založenú na reálnych číslach. Reálna a imaginárna časť bežných amplitúd sa nesú ako dodatočný reálny záznam — práca ho nazýva „príznamom“ pripojeným ku každému systému — a nepozorovateľná globálna fáza komplexnej teórie sa v reálnej teórii mení na rovnako nepozorovateľnú rotáciu. Cena sa prejaví presne tam, kam ukázal výsledok z roku 2021: pri skladaní systémov. Naivné zlepenie týchto reálnych opisov neposkytuje ani dobre definovaný postup, a konštrukcia preto zoskupuje opisy predstavujúce tú istú fyziku a pracuje s ich triedami. S týmto pravidlom skladania reprodukuje reálna teória každú očakávanú hodnotu predpovedanú komplexnou teóriou — pre jediný systém aj pre mnoho previazaných systémov pri oddelených stranách. Autori tiež ukazujú, že konštrukcia je v podstate jediná a je ekvivalentná štandardnej kvantovej mechanike.

Viacstranné experimenty teda túto reálnu teóriu od komplexnej nerozlíšia, pretože sa zhodujú vo všetkých predpovediach. Skoršie experimenty nezlyhali; iba testovali inú, reštriktívnejšiu reálnu teóriu.

Prečo to nie je rozpor

Výsledok by sa dal ľahko vyložiť ako tvrdenie, že „experimenty z roku 2021 boli chybné“. Opak je pravdou. Experimenty boli správne a práca na ich správnosti stavia: prijíma všetky namerané korelácie a ukazuje reálnu formuláciu, ktorá ich tiež vytvára. Revíziu si vyžaduje interpretácia — skok od výroku „táto reálna teória bola vyvrátená“ k výroku „reálne čísla sú v kvantovej mechanike nemožné“. Pri tomto skoku sa stratil predpoklad, ktorý v skutočnosti rozhodoval.

Práca takisto netvrdí, že by mal ktokoľvek komplexné čísla opustiť. Jej vlastné zhrnutie je opatrné v oboch smeroch: komplexné čísla nie sú striktne nevyhnutné a sú veľmi užitočné. Reálna konštrukcia potrebuje v každom systéme ďalší príznak a jemnejšie pravidlo na ich skladanie; komplexné čísla všetko balia do jediného prehľadného aritmetického aparátu. Pohodlnosť nie je maličkosť. Vo fyzike býva celým dôvodom, prečo jeden formalizmus zvíťazí.

Prečo na tom záleží

Pod výsledkom sa skrýva zaujímavá otázka, čo v rámci fyzikálnej teórie znamená „nevyhnutný“. Experiment dokáže rozlíšiť dve teórie, ak predpovedajú odlišné výsledky. Sám však nemôže ukázať, že určitá matematická zložka je jediným možným nositeľom daného súboru predpovedí — to je otázka existencie teórie, o ktorej rozhoduje konštrukcia, nie meranie. Táto práca je práve takou konštrukciou: predkladá alternatívu, ktorú mali experimenty údajne vylúčiť.

Výsledok tiež zostruje rozlíšenie užitočné ďaleko za týmto prípadom. „Táto teória bola vyvrátená“ a „tento matematický nástroj je nevyhnutný“ sú dva odlišné výroky a práve v medzere medzi nimi sa

môže jasný experimentálny výsledok zmeniť na zveličenie. Komplexné čísla zostávajú prirodzeným a účinným jazykom kvantovej mechaniky. Či sú metafyzicky nutné, je iná otázka a súčasná odpoveď znie: nie.

Stručné zhrnutie

Návrh z roku 2021 a experimenty z roku 2022 ukázali, že kvantová mechanika založená na reálnych číslach a štandardnom pravidle tenzorového súčinu na skladanie systémov poskytuje iné, testovateľné predpovede než komplexná kvantová mechanika, pričom experimenty podporili komplexnú teóriu. Často sa to podávalo ako dôkaz, že imaginárne čísla sú fyzikálne nevyhnutné. Nová práca v *Physical Review Letters* konštruje kvantovú mechaniku založenú na reálnych číslach a inom postuláte lokálnosti, ktorá reprodukuje všetky predpovede komplexnej teórie vrátane viacstranných testov – a ukazuje tak, že komplexné čísla sú pohodlné, nie však striktne nevyhnutné. Ide o teoretickú konštrukciu, nevyvracia skoršie experimenty a nevyzýva na praktické preformulovanie kvantovej mechaniky.

Kontrola bez príkras

Čo práca ukazuje: Konzistentná formulácia kvantovej mechaniky založená výlučne na reálnych číslach môže reprodukovať každú predpoveď štandardnej komplexnej teórie vrátane viacstranných experimentov Bellovho typu, ak pri skladaní systémov vychádza z postulátu lokálnosti namiesto pravidla tenzorového súčinu.

Čo je možné, ale nie je podstatou výsledku: Že výsledok „vyvracia“ výsledky z rokov 2021–2022. Nevyvracia. Prijíma experimenty ako správne a nanovo vymedzuje ich dosah: vylúčili jednu konkrétnu reálnu teóriu so zachovaným pravidlom tenzorového súčinu, nie reálne čísla ako také.

Čo práca neukazuje: Že sú komplexné čísla chybné či neužitočné alebo že by ich mala prax opustiť – autori ich výslovne označujú za veľmi užitočné. Nejde ani o nový experiment: nenamerali sa nijaké nové údaje; tvrdenie má podobu matematickej konštrukcie a dôkazu konzistencie.

Hlavné obmedzenia pre bežného čitateľa: Argument závisí od toho, ktorý predpoklad považujeme za fyzikálne základnejší – pravidlo tenzorového súčinu alebo postulát lokálnosti. Ide o obhájitelnú voľbu v prebiehajúcej diskusii o základoch teórie, nie o skutočnosť stanovenú meraním, a reálna konštrukcia je zrejme menej prirodzená než jej komplexný náprotivok.

Akú veľkú dôveru by mal mať bežný čitateľ? Vysokú v matematickú konzistentnosť konštrukcie – práca prešla recenzným konaním a jej logiku možno overiť. Dôveru si zaslúži skromný záver: komplexné čísla sú pohodlným jazykom kvantovej mechaniky, nie preukázanou metafyzickou nutnosťou. Titulky typu „imaginárne čísla sú skutočné“ je vhodné chápať ako slogan, ktorý táto práca opravuje.

Zdroje

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>