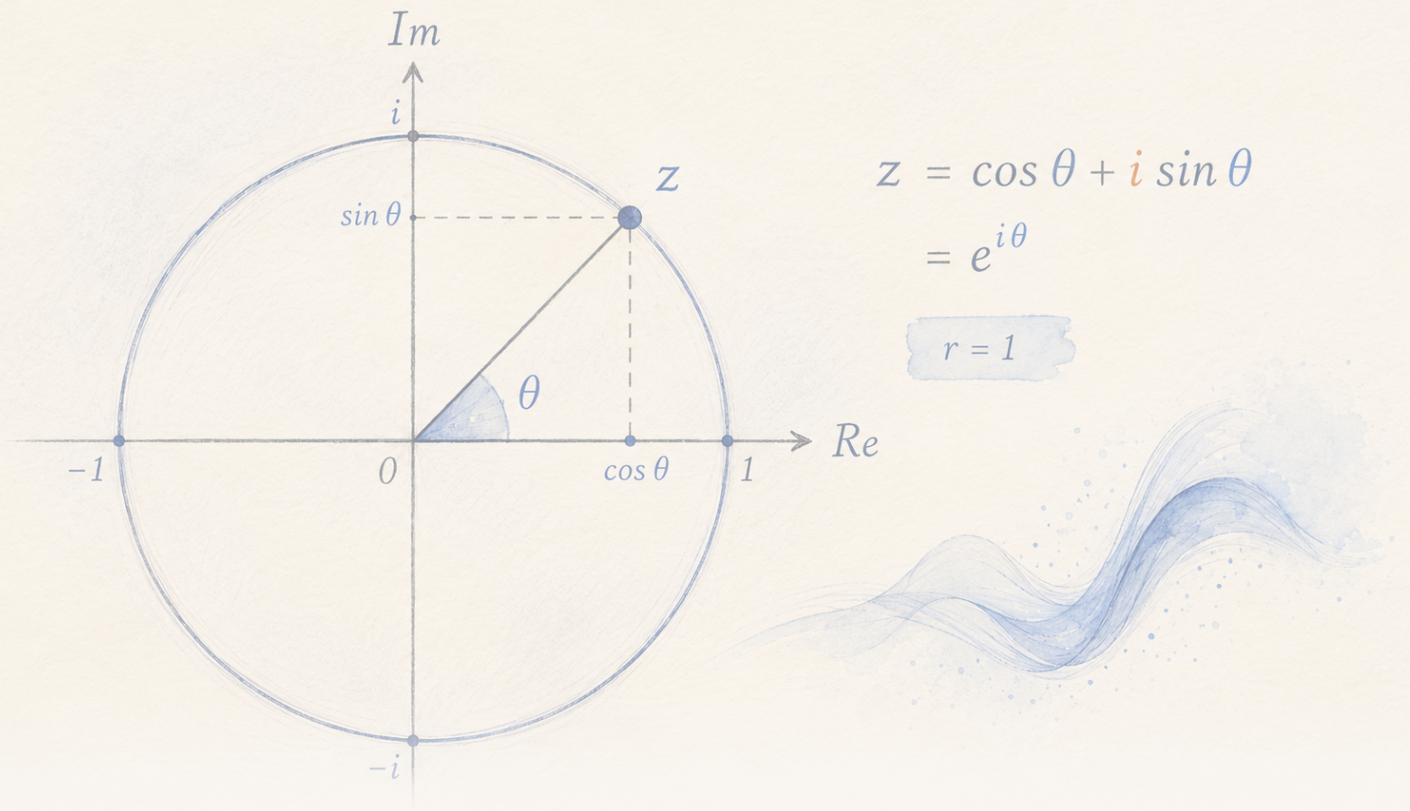




The CLEAN PAPER

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

Mecanica cuantică poate fi scrisă numai cu numere reale — problema este cum combini sistemele

În 2021, un rezultat relatat pe larg susținea că o versiune pe numere reale a mecanicii cuantice ar putea fi falsificată experimental, iar experimentele ulterioare din 2022 au fost de acord cu teoria cuantică complexă standard. Asta a fost adesea transformat în titluri despre dovada că numerele imaginare sunt reale fizic. Un nou articol din Physical Review Letters clarifică afirmația: dacă construiești formularea pe numere reale pe o presupunere diferită, probabil mai fizică, despre felul în care se combină sistemele separate, ea reproduce fiecare predicție a mecanicii cuantice complexe, inclusiv testele multipartite. Lectura onestă este că numerele complexe sunt convenabile mai degrabă decât strict necesare — și că experimentele anterioare au exclus o anumită teorie reală, nu numerele reale în principiu. Este un rezultat de fundamente pe hârtie, nu o măsurare nouă, și nu cere nimănui să înceteze să folosească numere complexe.

Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · 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

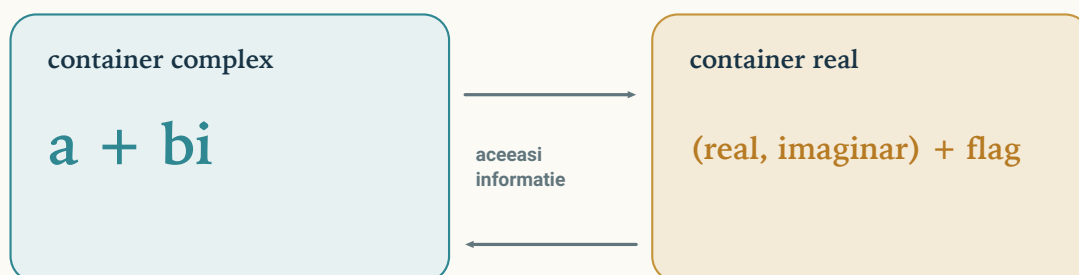
Un titlu care merită recitat

Acum câțiva ani a circulat o afirmație puternică: experimentele ar fi arătat că numerele imaginare sunt reale fizic, că mecanica cuantică nu poate fi scrisă fără ele. Afirmația venea din fizică reală și atentă — o propunere din 2021 în *Nature* de Marc-Olivier Renou și colegii săi, și experimentele din 2022 care au pus-o în practică. Dar versiunea populară a comprimat o propoziție precisă într-un slogan, iar sloganul era mai tare decât rezultatul.

Un nou articol în *Physical Review Letters*, de Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping și Dagmar Bruß, pune la loc propoziția precisă. Construiește o versiune a mecanicii cuantice care folosește numai numere reale și reproduce fiecare predicție a teoriei complexe standard — inclusiv exact experimentele multipartite despre care s-a spus că exclud numerele reale. Trucul nu este să strecoare numere imaginare înapoi. Este să schimbe o presupunere despre cum se combină sistemele separate. Concluzia onestă, în cuvintele autorilor, este că numerele complexe nu sunt necesare pentru a descrie mecanica cuantică, dar sunt cu siguranță foarte utile.

Teoria reala muta contabilitatea

O amplitudine complexa poate fi purtata ca doua componente reale. Costul apare cand sistemele se combina.

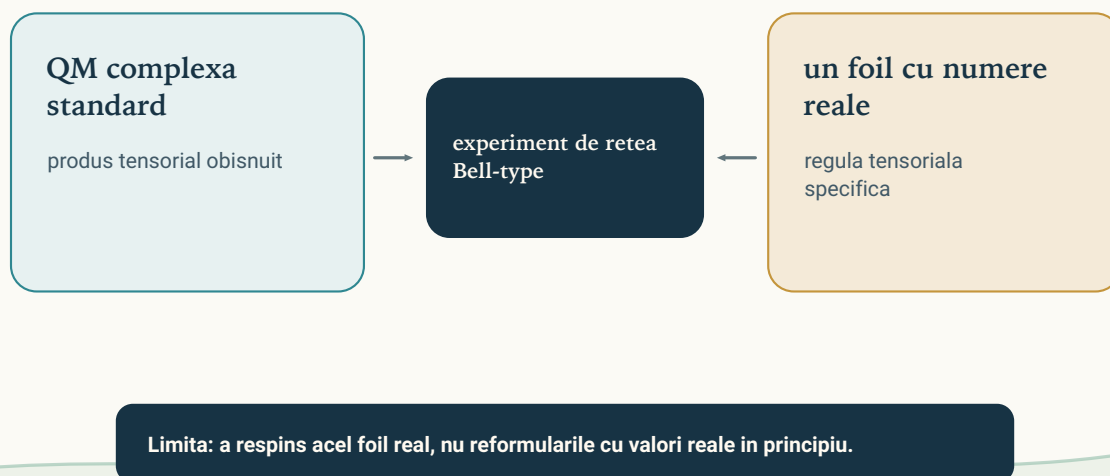


Limita: nu mai putine ingrediente; un container diferit al carui cost apare in compunere.

O amplitudine complexă $a+bi$ este o pereche de numere reale cu un "flag" purtat alături de fiecare sistem. Formularea reală nu are mai puține ingrediente — doar un recipient diferit, cu prețul apărând în felul în care se combină sistemele.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Ce a arbitrat de fapt testul din 2021



Experimentele din 2021-2022 au comparat două teorii specifice — mecanica cuantică complexă standard cu o "foil" reală care păstrează regula produsului tensorial — și au favorizat teoria complexă. Au exclus acea foil, nu numerele reale în principiu.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Ce fac numerele complexe în teorie

În mecanica cuantică, starea unui sistem este descrisă prin amplitudini, iar pentru a obține probabilitatea unui rezultat ieși mărimea la pătrat a unei amplitudini. În teoria standard acele amplitudini sunt numere complexe: fiecare poartă o mărime și o fază, adică un unghi. Faza nu este decor. Când două drumuri spre același rezultat se combină, fazele lor decid dacă se întăresc sau se anulează — interferența care este semnătura comportamentului cuantic. O fază globală împărtășită de întregul sistem, în schimb, nu poate fi măsurată niciodată.

Un număr complex este de fapt doar o pereche de numere reale — o parte reală și o parte imaginară — împachetată cu reguli specifice pentru felul în care se înmulțesc. Deci întrebarea naturală este dacă acest ambalaj este esențial. Ai putea păstra cele două numere reale, arunca ambalajul complex și totuși avea toată mecanica cuantică? Regulile de înmulțire sunt ceea ce fac numerele complexe mai mult decât două numere puse unul lângă altul, deci răspunsul nu este evident, iar subtilitatea acolo stă.

Ce a stabilit de fapt rezultatul din 2021

Renou și colegii au pus exact această întrebare și i-au dat o formă clară, testabilă. Nu au întrebat dacă numerele reale pot apărea undeva în teoria cuantică; au întrebat dacă o formulare cu numere reale poate egala toate predicțiile teoriei complexe dată o regulă anume pentru combinarea sistemelor. Acea regulă — să-i spunem regula produsului tensorial — este prescripția standard pentru a descrie mai multe părți independente ca un singur întreg.

Sub acea regulă, au găsit un scenariu cu trei părți care împart entanglement din două surse independente în care o teorie cu numere reale și teoria complexă prezic corelații diferite, măsurabile — o versiune multipartită a unui test Bell. În 2022, experimente cu circuite supraconductoare și cu fotoni au făcut astfel de teste. Corelațiile măsurate au corespuns mecanicii cuantice complexe și au fost incompatibile cu alternativa reală.

De ce testul are nevoie de două surse, nu de una

Un test Bell obișnuit folosește o singură sursă care trimite o pereche entangled către două persoane, Alice și Bob. Pentru această configurație, o mecanică cuantică pe numere reale poate reproduce exact aceleași corelații ca teoria complexă — cele două sunt imposibil de deosebit, deci o singură sursă nu poate decide între ele.

Argumentul din 2021 capătă forță adăugând o a doua sursă **independentă**. Imaginează-ți trei părți într-o linie: Alice, Bob, Charlie. O sursă o entanglează pe Alice cu Bob; o sursă separată, fără trecut comun, îl entanglează pe Bob cu Charlie. Bob stă la mijloc și își măsoară împreună cele două particule, legând cele două jumătăți. *Independența* celor două surse — presupunerea că au fost pregătite separat — este cea care face treaba: sub regula standard a produsului tensorial pentru combinarea sistemelor independente, o teorie cu numere reale nu poate egala corelațiile în trei pe care mecanica cuantică complexă le prezice pentru această rețea, în timp ce un test cu o singură sursă lasă cele două teorii la egalitate. Acel decalaj este ceea ce au măsurat experimentele.

Acesta este un rezultat real și curat. Dar observă atent ce a comparat: teoria cuantică complexă standard cu o teorie reală specifică — cea care păstrează regula obișnuită a produsului tensorial. Acea pereche, nu numerele reale ca atare, este ceea ce au judecat experimentele. Noul articol, împrumutând termenul din fundamentele cuantice, numește alternativa exclusă așa cum este: o *foil theory* — o teorie pe care nimeni nu o propune ca adevărată, construită ca contrast deliberat cu teoria acceptată, astfel încât experimentul să le poată deosebi. Întreaga ei valoare este că poate fi distinsă: excluderea foil theory arată care dintre presupunerile teoriei reale făceau treaba.

Ce schimbă noul articol

Noua lucrare păstrează aproape totul și schimbă un postulat. În loc să presupună regula produsului tensorial pentru combinarea sistemelor, pornește de la o cerință de localitate pe care autorii o

consideră mai fundamentală fizic: o operație făcută doar asupra unui subsistem nu ar trebui să aibă niciun efect măsurabil asupra altui subsistem, neatins.

Din acest punct de plecare construiesc explicit o mecanică cuantică pe numere reale. Părțile reală și imaginară ale amplitudinilor obișnuite sunt purtate mai departe ca o contabilitate reală suplimentară — articolul o numește un “flag” atașat fiecărui sistem — iar faza globală neobservabilă a teoriei complexe devine o rotație la fel de neobservabilă în teoria reală. Prețul apare exact acolo unde rezultatul din 2021 îl localizase: în felul în care se combină sistemele. Modul naiv de a lipi aceste descrieri reale nici măcar nu dă o rețetă bine definită, așa că construcția grupează în schimb descrierile care reprezintă aceeași fizică și lucrează cu acele clase. Cu acea regulă de combinare, teoria reală reproduce fiecare valoare de așteptare pe care o prezice teoria complexă — pentru un sistem și pentru multe, entangled între părți separate. Autorii arată și că această construcție este în esență unică și echivalentă cu mecanica cuantică standard.

Deci experimentele multipartite nu pot distinge această teorie reală de cea complexă, pentru că cele două sunt de acord asupra fiecărei predicții. Experimentele anterioare nu au eșuat; pur și simplu testau împotriva unei teorii reale diferite, mai restrictive.

De ce nu este o contradicție

Ar fi ușor să citești asta ca “experimentele din 2021 au fost greșite”. Este opusul. Experimentele au fost corecte, iar acest articol depinde de faptul că au fost corecte: acceptă fiecare corelație măsurată și arată o formulare reală care le produce și ea. Ce revizuieste este interpretarea — saltul de la “această teorie reală este falsificată” la “numerele reale sunt imposibile în mecanica cuantică”. Acel salt a trecut peste presupunerea care făcea treaba.

Nici articolul nu susține că cineva ar trebui să abandoneze numerele complexe. Propriul lui rezumat este atent în ambele direcții: numerele complexe nu sunt strict necesare și sunt foarte utile. Construcția reală are nevoie de un flag suplimentar pe fiecare sistem și de o regulă mai delicată pentru combinarea lor; numerele complexe împachetează toate acestea într-o bucată curată de aritmetică. Comoditatea nu este nimic. În fizică este adesea chiar motivul pentru care un formalism câștigă.

De ce contează

Întrebarea interesantă de dedesubt este ce înseamnă “necesar” pentru o teorie fizică. Un experiment poate deosebi două teorii când ele prezic lucruri diferite. Nu îți poate spune, singur, că un anumit ingredient matematic este singurul recipient posibil pentru un set de predicții — aceasta este o întrebare despre ce teorii există, și se rezolvă prin construcție, nu prin măsurare. Acest articol este o construcție: arată alternativa despre care s-a crezut că experimentele au exclus-o.

Rezultatul clarifică și o distincție care merită păstrată în general. “Această teorie este falsificată” și “acest instrument matematic este inevitabil” sunt afirmații diferite, iar spațiul dintre ele este exact

locul unde un rezultat experimental curat poate deveni overclaim. Numerele complexe rămân limbajul natural și eficient al mecanicii cuantice. Dacă sunt cerute metafizic este o întrebare separată, iar la acea întrebare răspunsul, deocamdată, este nu.

Sinteză curată

O propunere din 2021 și experimentele din 2022 au arătat că o mecanică cuantică pe numere reale construită pe regula standard a produsului tensorial pentru combinarea sistemelor face predicții diferite și testabile față de mecanica cuantică complexă, iar experimentele au favorizat teoria complexă. Acest lucru a fost relatat pe scară largă ca dovadă că numerele imaginare sunt fizic necesare. Noul articol din *Physical Review Letters* construiește o mecanică cuantică pe numere reale pe un postulat diferit, bazat pe localitate, care reproduce toate predicțiile teoriei complexe, inclusiv testele multipartite — arătând că numerele complexe sunt convenabile, nu strict necesare. Este o construcție teoretică, nu răstoarnă experimentele anterioare și nu cere reformularea mecanicii cuantice în practică.

Verificare fără ocolișuri

Ce arată articolul: Că o formulare auto-consistentă a mecanicii cuantice folosind numai numere reale poate reproduce fiecare predicție a teoriei complexe standard, inclusiv experimentele multipartite de tip Bell, dacă este construită pe un postulat de localitate în locul regulii produsului tensorial pentru combinarea sistemelor.

Ce este plauzibil, dar nu este punctul: Că acest lucru “respinge” rezultatele din 2021-2022. Nu le respinge. Acceptă acele experimente ca fiind corecte și le reinterpretează perimetrul: ele au exclus o teorie reală specifică, cea care păstrează regula produsului tensorial, nu numerele reale în principiu.

Ce nu arată: Că numerele complexe sunt greșite, inutile sau merită abandonate în practică — articolul le numește explicit foarte utile. Nu este nici un experiment nou: nu au fost măsurate date; afirmația este o construcție matematică și o dovadă de consistență.

Limitele principale pentru un cititor general: Argumentul depinde de care presupunere o consideri mai fundamentală fizic — regula produsului tensorial sau postulatul de localitate. Aceasta este o alegere argumentată într-o dezbateră de fundamente încă deschisă, nu un fapt fixat prin măsurare, iar construcția pe numere reale este probabil mai puțin naturală decât cea complexă pe care o egalează.

Câtă încredere ar trebui să aibă un cititor general? Mare că această construcție este matematic coerentă — este evaluată inter pares, iar logica ei poate fi verificată. Concluzia de încredere este cea modestă: numerele complexe sunt limbajul convenabil al mecanicii cuantice, nu o necesitate metafizică dovedită. Tratează orice titlu de forma “numerele imaginare sunt reale” ca sloganul pe care acest articol a fost scris să îl corecteze.

Sources

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>