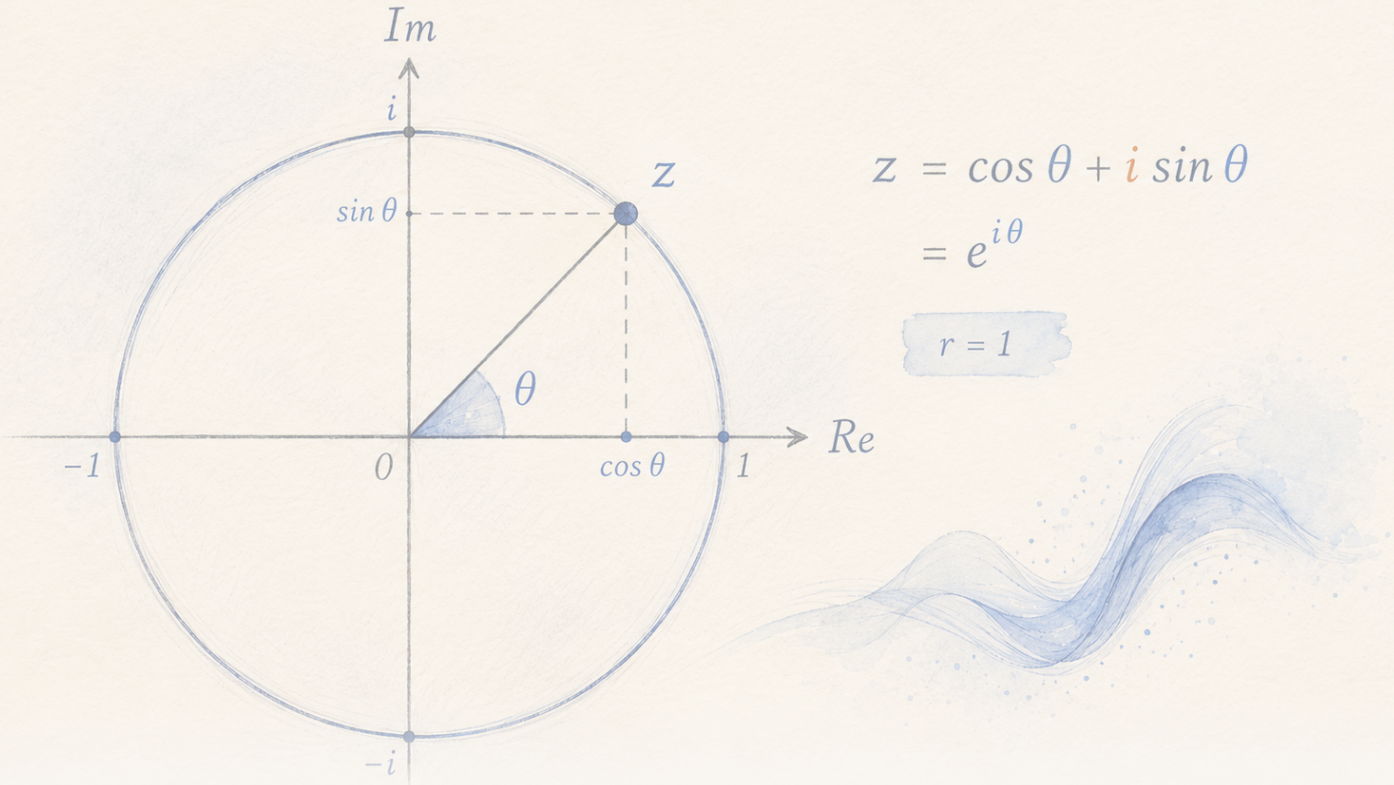


The Clean Paper

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

Kvantno mehaniko je mogoče zapisati samo z realnimi števili — zaplet je v tem, kako združujemo sisteme

Leta 2021 je odmeven rezultat trdil, da je mogoče različico kvantne mehanike z realnimi števili eksperimentalno ovreči, poskusi leta 2022 pa so se ujemali s standardno kompleksno kvantno teorijo. To se je pogosto povzelo kot dokaz, da so imaginarna števila fizično resnična. Nov članek v Physical Review Letters trditev izostri: če realno formulacijo zgradimo na drugačni, po mnenju avtorjev bolj fizikalni predpostavki o tem, kako se ločeni sistemi združujejo, reproducira vse napovedi kompleksne kvantne mehanike, tudi večdelne teste. Previdna razlaga je, da so kompleksna števila priročna, ne pa strogo nujna — in da so prejšnji poskusi izločili eno določeno realno teorijo, ne realnih števil načeloma. Gre za teoretični rezultat o temeljih, ne za novo meritev, in nihče ne predlaga, naj fiziki prenehajo uporabljati kompleksna števila.

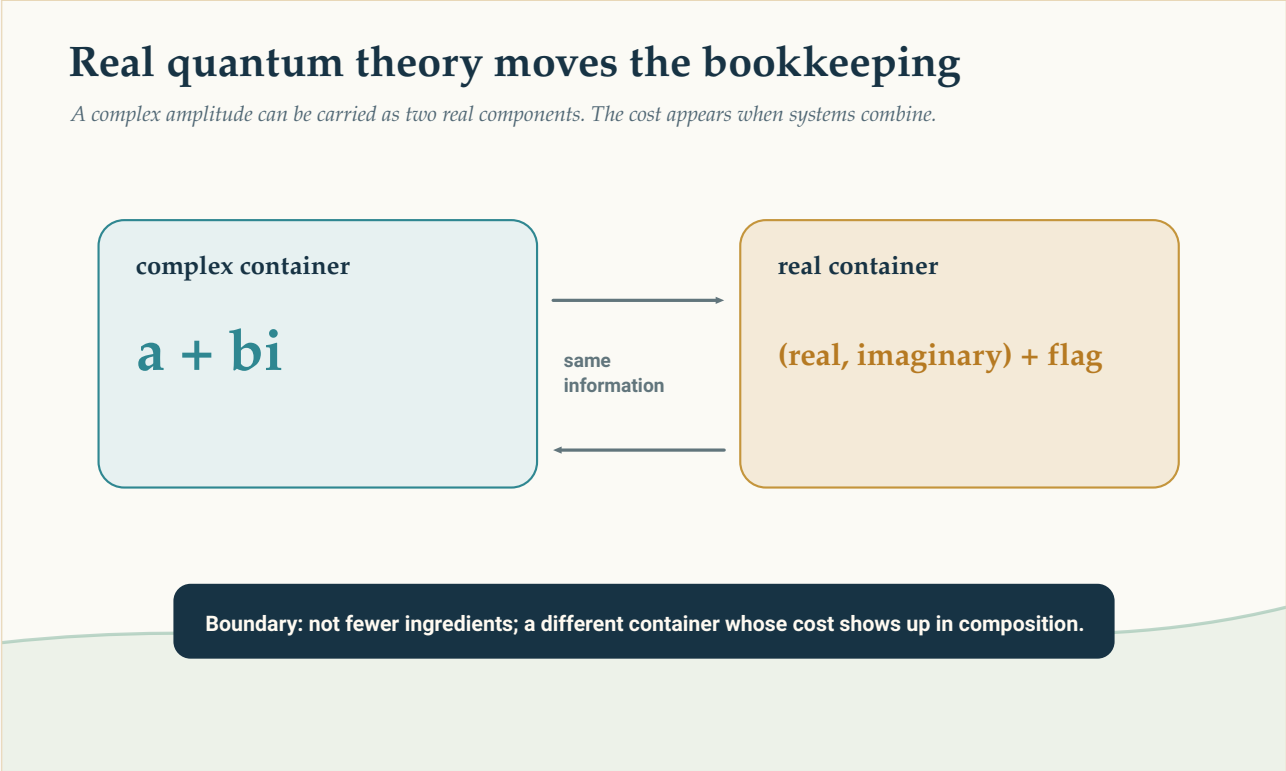
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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

Naslov, ki ga je vredno prebrati še enkrat

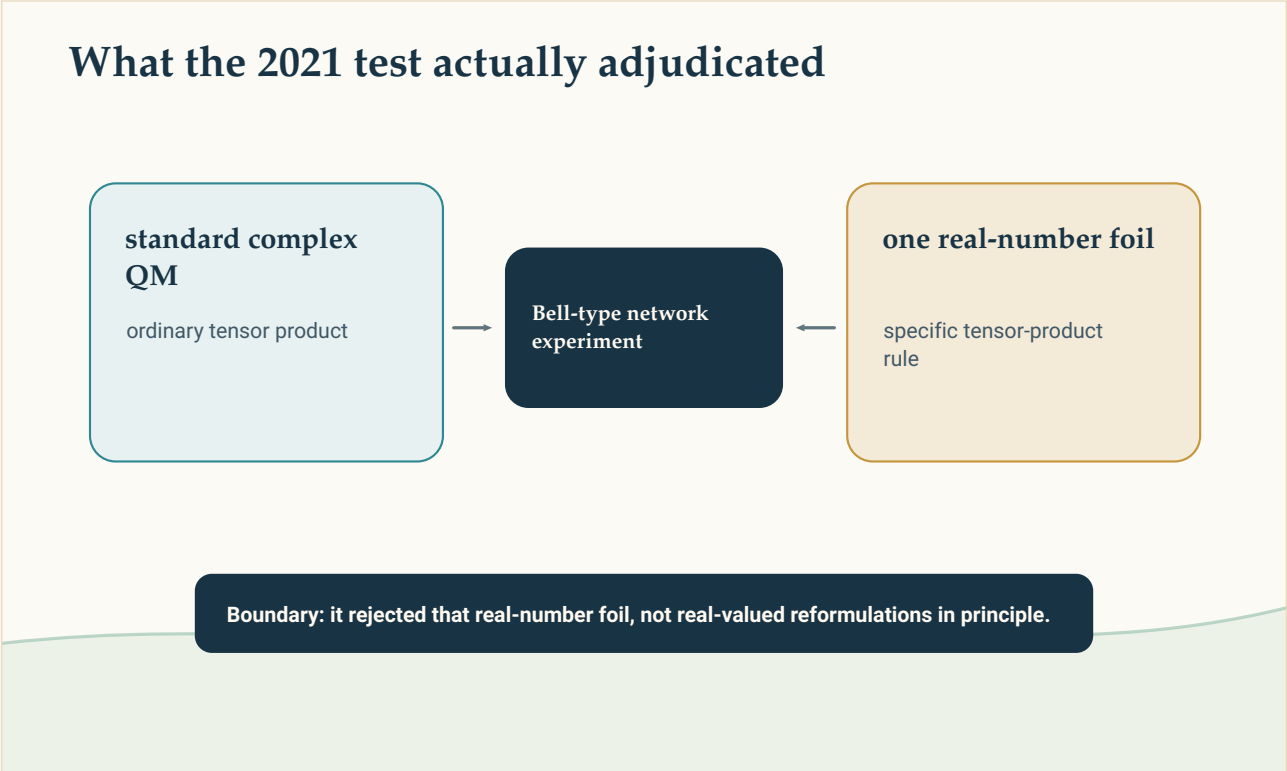
Pred nekaj leti je zaokrožila presenetljiva trditev: poskusi naj bi pokazali, da so imaginarna števila fizično resnična in da kvantne mehanike brez njih ni mogoče zapisati. Trditev je izhajala iz resne in skrbne fizike — predloga Marca-Olivierja Renouja in sodelavcev iz leta 2021 v reviji *Nature* ter poskusov iz leta 2022, ki so predlog preverili. Toda poljudna različica je natančno izjavo stisnila v slogan, slogan pa je bil močnejši od dejanskega rezultata.

Nov članek Pedra Barriosa Hite, Antona Trushechkina, Hermanna Kampermanna, Michaela Eppinga in Dagmar Bruß v *Physical Review Letters* vrne trditev v natančne okvire. Avtorji zgradijo različico kvantne mehanike, ki uporablja samo realna števila in reproducira vse napovedi standardne kompleksne teorije — tudi prav tiste večdelne poskuse, za katere se je govorilo, da so realna števila izločili. Trik ni v tem, da bi imaginarna števila skrivaj vrnili v teorijo. Spremeni se ena predpostavka o tem, kako združujemo ločene sisteme. Pošten sklep, kot ga zapišejo sami avtorji, je, da kompleksna števila za opis kvantne mehanike niso nujna, so pa nedvomno zelo uporabna.



Kompleksna amplituda a+bi je par realnih števil skupaj z dodatno »oznako«, ki jo nosi vsak sistem. Realna formulacija nima manj sestavin — uporablja le drugačen način zapisa, cena pa se pokaže pri združevanju sistemov.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Poskusi iz let 2021–22 so primerjali dve konkretni teoriji — standardno kompleksno kvantno mehaniko in realno primerjalno teorijo, ki ohrani običajno pravilo tenzorskega produkta — ter podprli kompleksno. Izločili so to primerjalno teorijo, ne realnih števil načeloma.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Kaj v teoriji počnejo kompleksna števila

V kvantni mehaniki stanje sistema opisujemo z amplitudami, verjetnost izida pa dobimo iz kvadrata njihove velikosti. V standardni teoriji so te amplitude kompleksna števila: vsako ima velikost in fazo, torej kot. Faza ni okras. Ko se dve poti do istega izida združita, njuni fazi določita, ali se bosta okrepili ali izničili — to je interferenca, eden od značilnih znakov kvantnega vedenja. Skupne faze celotnega sistema pa ni mogoče izmeriti.

Kompleksno število je v bistvu par realnih števil — realni in imaginarni del — skupaj s posebnimi pravili množenja. Zato je naravno vprašanje, ali je takšno pakiranje bistveno. Bi lahko obdržali obe realni števili, opustili kompleksni zapis in še vedno dobili vso kvantno mehaniko? Pravila množenja so tisto, zaradi česar je kompleksno število več kot dve številki druga ob drugi, zato odgovor ni očiten. Tu se skriva bistvo problema.

Kaj je rezultat iz leta 2021 dejansko pokazal

Renou in sodelavci so si zastavili prav to vprašanje in ga oblikovali tako, da ga je bilo mogoče eksperimentalno preveriti. Niso spraševali, ali se lahko realna števila kjer koli pojavijo v kvantni teoriji. Vprašali so, ali lahko formulacija z realnimi števili reproducira vse napovedi kompleksne teorije, če ohranimo določeno pravilo za združevanje sistemov. To pravilo — imenovali ga bomo pravilo tenzorskega produkta — je standardni način, kako več neodvisnih delov opišemo kot eno celoto.

Pod to predpostavko so našli scenarij s tremi udeleženci, ki si delijo prepletenost iz dveh neodvisnih virov, v katerem realna in kompleksna teorija napovesta različne, merljive korelacije — večdelno različico Bellovega testa. Leta 2022 so takšne teste izvedli s superprevodnimi vezji in fotoni. Izmerjene korelacije so se ujemale s kompleksno kvantno mehaniko in niso bile skladne z realno alternativo.

> **Zakaj test potrebuje dva vira, ne enega**
>
> Običajen Bellov test uporablja en vir, ki pošlje prepleteni par dvema osebama, Alice in Bobu. Pri takšni postavitvi lahko kvantna mehanika z realnimi števili reproducira natanko iste korelacije kot kompleksna teorija — teorij ni mogoče ločiti, zato en vir ne zadostuje.
> Argument iz leta 2021 pridobi razlikovalno moč z drugim, **neodvisnim** virom. Predstavljajte si tri udeležence v vrsti: Alice, Boba in Charlieja. En vir preplete Alice z Bobom; drugi, ločen vir brez skupne preteklosti preplete Boba s Charliejem. Bob je v sredini in skupaj izmeri svoja dva delca, s čimer poveže obe polovici. Odločilna je *neodvisnost* obeh virov — predpostavka, da sta bila pripravljena ločeno. Pri standardnem pravilu tenzorskega produkta realna teorija ne more reproducirati trosmernih korelacij, ki jih za to mrežo napove kompleksna kvantna mehanika, medtem ko pri enem viru teoriji ostaneta izenačeni. Prav to razliko so merili poskusi.

To je resničen in jasen rezultat. Toda pozorno poglejmo, kaj je bilo primerjano: standardna kompleksna kvantna teorija in ena specifična realna teorija — tista, ki obdrži običajno pravilo tenzorskega produkta. Poskusi so presojali ta par teorij, ne realnih števil kot takih. Novi članek za izločeno alternativo uporabi izraz iz temeljev kvantne teorije: *primerjalna teorija* (foil theory) — teorija, ki je nihče ne zagovarja kot resnično, temveč jo namerno postavimo ob sprejeto teorijo, da lahko poskus razlikuje med njima. Njena vrednost je prav v tem, da je razločljiva: ko jo izločimo, vidimo, katere predpostavke realne teorije so bile odločilne.

Kaj spremeni novi članek

Novo delo ohrani skoraj vse in spremeni en postulat. Namesto da bi predpostavili pravilo tenzorskega produkta za združevanje sistemov, avtorji izhajajo iz zahteve po lokalnosti, ki jo imajo za bolj temeljno fizikalno načelo: operacija, izvedena samo na enem podsistemu, ne sme imeti merljivega učinka na drugi, nedotaknjeni podsistem.

Iz tega izhodišča izrecno zgradijo kvantno mehaniko z realnimi števili. Realni in imaginarni del običajnih amplitud se vodita kot dodatna realna informacija — članek jo imenuje »oznaka« (flag),

priložena vsakemu sistemu — nemerljiva globalna faza kompleksne teorije pa postane enako nemerljiva rotacija v realni teoriji. Cena se pokaže prav tam, kjer jo je našel rezultat iz leta 2021: pri združevanju sistemov. Naivno lepljenje teh realnih opisov ne da niti enolično definiranega postopka, zato konstrukcija združi opise, ki predstavljajo isto fiziko, in dela z njihovimi ekvivalenčnimi razredi. S takšnim pravilom združevanja realna teorija reproducira vse pričakovane vrednosti kompleksne teorije — za posamezen sistem in za več med seboj prepletenih, prostorsko ločenih sistemov. Avtorji pokažejo tudi, da je konstrukcija v bistvu enolična in ekvivalentna standardni kvantni mehaniki.

Večdelni poskusi zato te realne teorije ne morejo ločiti od kompleksne, saj se njune napovedi v celoti ujemajo. Prejšnji poskusi niso spodleteli; preprosto so preverjali drugo, bolj omejujočo realno teorijo.

Zakaj to ni protislovje

Lahko bi pomislili, da novi članek pravi: »poskusi iz leta 2021 so bili napačni«. Ravno nasprotno. Poskusi so bili pravilni, novi članek pa je od njihove pravilnosti odvisen: sprejme vse izmerjene korelacije in pokaže realno formulacijo, ki jih prav tako reproducira. Popravi se razlaga — preskok od »ta realna teorija je ovržena« do »realna števila v kvantni mehaniki niso mogoča«. Pri tem preskoku se je spregledala predpostavka, ki je omogočila razlikovanje.

Članek prav tako ne trdi, da bi morali fiziki opustiti kompleksna števila. Njegov povzetek je previden v obe smeri: kompleksna števila niso strogo nujna, so pa zelo uporabna. Realna konstrukcija potrebuje dodatno oznako pri vsakem sistemu in bolj občutljivo pravilo za njihovo združevanje; kompleksna števila vse to zapakirajo v eno elegantno aritmetično strukturo. Priročnost ni nepomembna. V fiziki je pogosto prav to razlog, da določen formalizem prevlada.

Zakaj je pomembno

V ozadju je zanimivo vprašanje, kaj v fizikalni teoriji pomeni beseda »nujno«. Poskus lahko razlikuje med teorijama, če napovedujeta različne izide. Sam po sebi pa ne more pokazati, da je določena matematična sestavina edini možni nosilec nekega nabora napovedi — to je vprašanje o tem, katere teorije lahko sploh zgradimo, in nanj odgovorimo s konstrukcijo, ne z meritvijo. Ta članek je takšna konstrukcija: pokaže alternativo, za katero se je pogosto domnevalo, da so jo poskusi že izključili.

Rezultat tudi izostri splošno pomembno razliko. »Ta teorija je ovržena« in »to matematično orodje je neizogibno« sta različni izjavi. Prav v prostoru med njima se lahko čist eksperimentalni rezultat spremeni v pretirano trditev. Kompleksna števila ostajajo naraven in učinkovit jezik kvantne mehanike. Ali so metafizično nujna, je drugo vprašanje — in za zdaj je odgovor ne.

Kratek povzetek

Predlog iz leta 2021 in poskusi leta 2022 so pokazali, da kvantna mehanika z realnimi števili, zgrajena s standardnim pravilom tenzorskega produkta za združevanje sistemov, napoveduje drugačne, preverljive rezultate kot kompleksna kvantna mehanika; poskusi so podprli kompleksno teorijo. To se je pogosto poročalo kot dokaz, da so imaginarna števila fizično nujna. Novi članek v *Physical Review Letters* pa zgradi kvantno mehaniko z realnimi števili na drugačnem postulatu lokalnosti, ki reproducira vse napovedi kompleksne teorije, tudi večdelne teste. S tem pokaže, da so kompleksna števila izjemno priročna, niso pa strogo nujna. Gre za teoretično konstrukcijo; prejšnjih poskusov ne razveljavlja in ne predlaga praktične reformulacije kvantne mehanike.

Preverjanje brez olepševanja

Kaj članek kaže: Da lahko notranje skladna formulacija kvantne mehanike, ki uporablja samo realna števila, reproducira vse napovedi standardne kompleksne teorije, tudi večdelne Bellovemu podobne poskuse, če je zgrajena na postulatu lokalnosti namesto na standardnem pravilu tenzorskega produkta za združevanje sistemov.

Kaj je mogoče reči, vendar ni bistvo: Da to »ovrže« rezultate iz let 2021–2022. Ne. Novi članek sprejme te poskuse kot pravilne in na novo določi njihov domet: izločili so eno specifično realno teorijo, ki ohrani pravilo tenzorskega produkta, ne realnih števil načeloma.

Česa ne kaže: Da so kompleksna števila napačna, neuporabna ali da bi jih bilo smiselno opustiti v praksi — članek jih izrecno označuje kot zelo uporabna. Prav tako to ni nov poskus: ni novih meritev; trditev je matematična konstrukcija in dokaz konsistentnosti.

Glavne omejitve za splošnega bralca: Argument je odvisen od tega, katero predpostavko imamo za fizikalno bolj temeljno — pravilo tenzorskega produkta ali postulat lokalnosti. To je utemeljena izbira v odprti razpravi o temeljih fizike, ne dejstvo, ki bi ga določila meritev; realna konstrukcija pa je verjetno manj naravna od kompleksne teorije, s katero se ujema.

Koliko zaupanja naj ima splošni bralec? Visoko, da je konstrukcija matematično skladna — delo je recenzirano, logiko pa je mogoče preveriti. Zanesljiv je skromnejši sklep: kompleksna števila so priročen jezik kvantne mehanike, ne dokazana metafizična nujnost. Naslove tipa »imaginarna števila so resnična« je bolje razumeti kot slogan, ki ga ta članek popravlja.

Viri

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