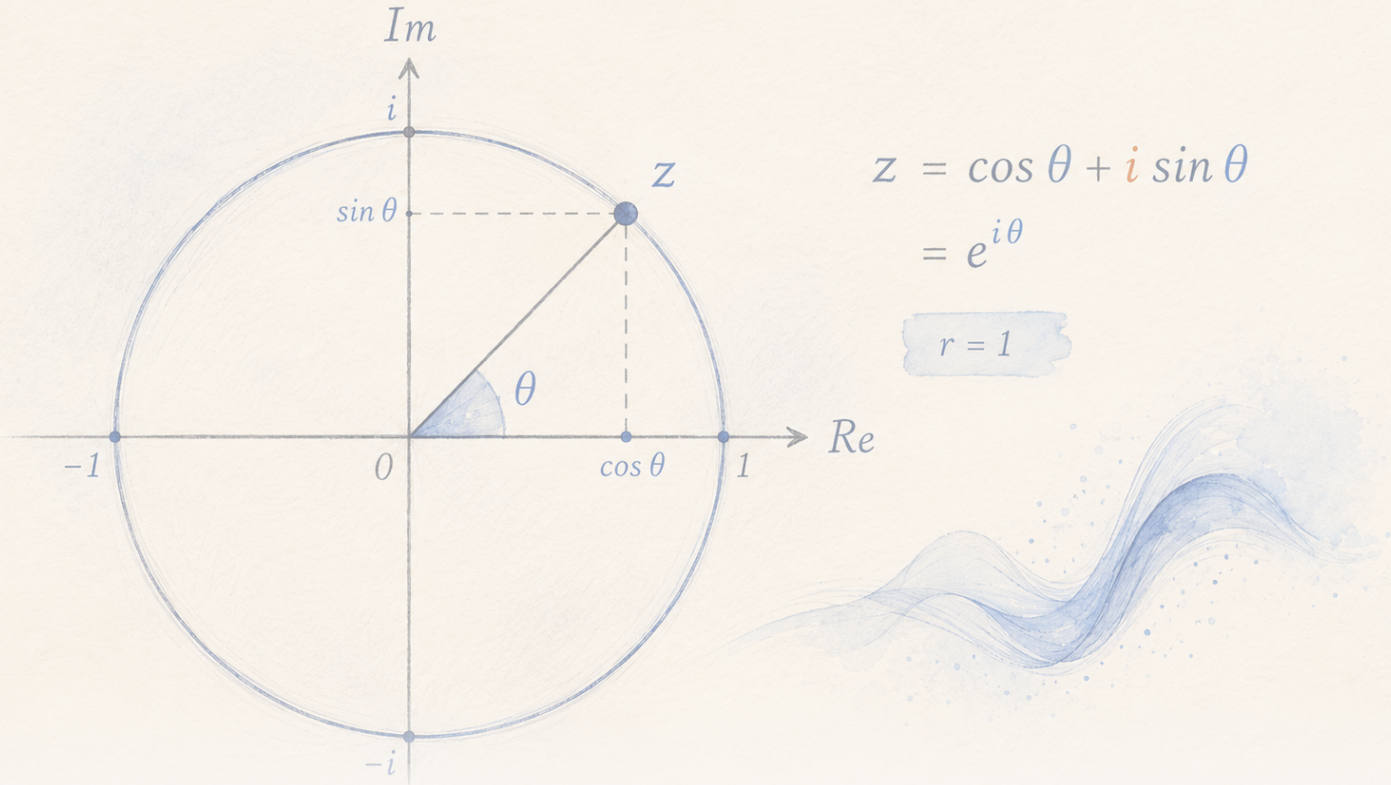


The Clean Paper

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

Kvantna mehanika može se zapisati samo realnim brojevima — začkoljica je u načinu spajanja sistema

Široko zapažen rezultat iz 2021. tvrdio je da se verzija kvantne mehanike s realnim brojevima može eksperimentalno opovrgnuti, a naknadni eksperimenti 2022. složili su se sa standardnom kompleksnom kvantnom teorijom. To se često predstavljalo kao dokaz da su imaginarni brojevi fizički stvarni. Novi rad u časopisu Physical Review Letters precizira tvrdnju: ako se formulacija s realnim brojevima zasnuje na drugačijoj, vjerovatno fizički uvjerljivijoj pretpostavci o tome kako se odvojeni sistemi spajaju, ona reproducira svako predviđanje kompleksne kvantne mehanike, uključujući višedijelne testove. Pošten zaključak glasi da su kompleksni brojevi praktični, ali ne i strogo neophodni — te da su raniji eksperimenti isključili jednu konkretnu realnu teoriju, a ne realne brojeve u načelu. To je teorijski rezultat o temeljima, ne novo mjerenje, i ne traži da iko prestane koristiti kompleksne brojeve.

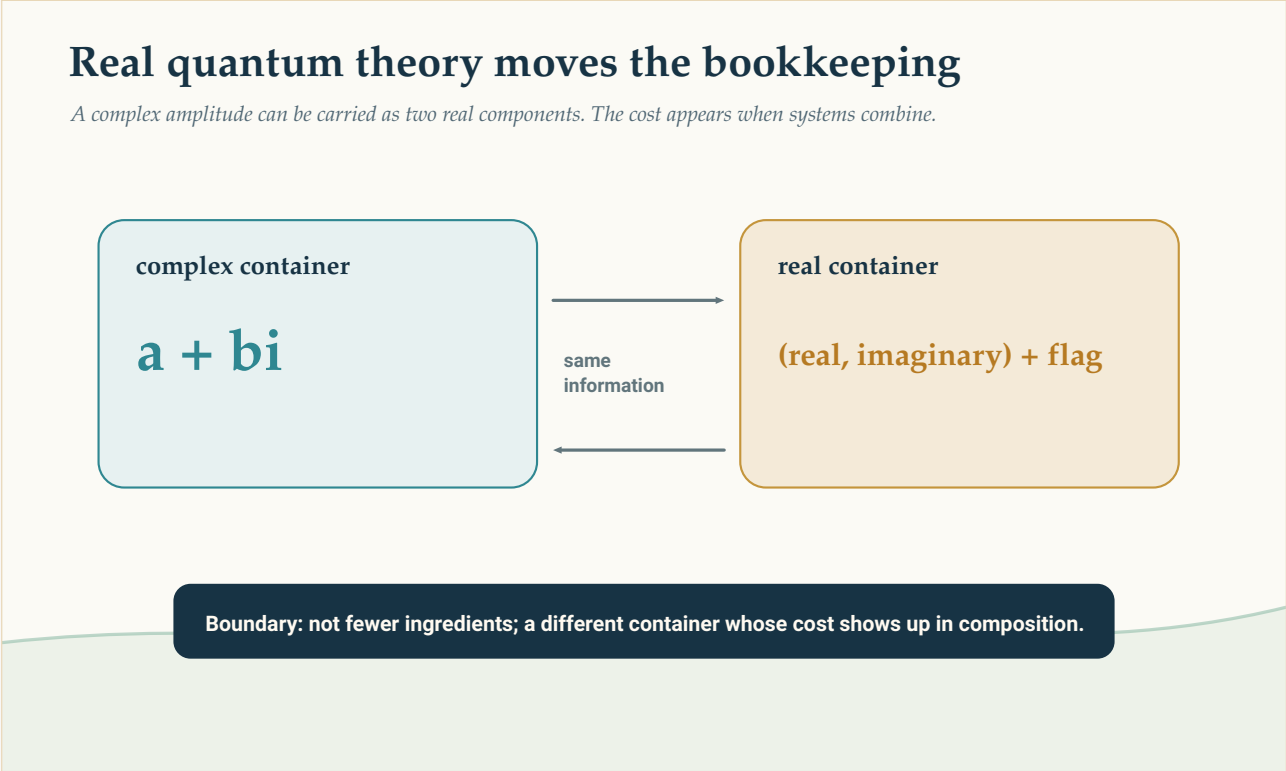
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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 koji vrijedi pročitati još jednom

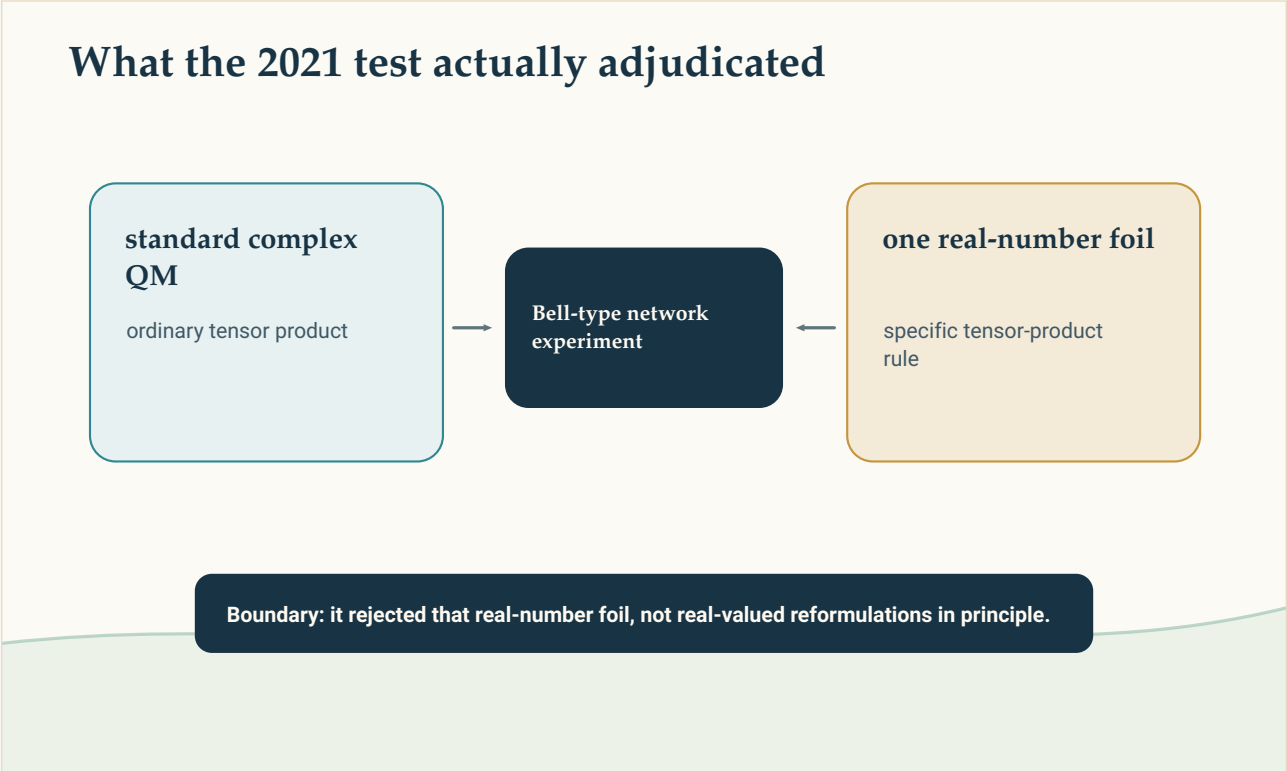
Prije nekoliko godina kružila je upečatljiva tvrdnja: eksperimenti su pokazali da su imaginarni brojevi fizički stvarni, da kvantna mehanika bez njih nije moguća. Tvrdnja je proizašla iz stvarne i pažljivo napravljene fizike — prijedloga iz 2021. Marca-Oliviera Renoua i saradnika u *Natureu* te eksperimenta iz 2022. koji su ga proveli. Ali popularna verzija sažela je preciznu tvrdnju u slogan, a slogan je bio jači od rezultata.

Novi rad u *Physical Review Lettersu* Pedra Barriosa Hite, Antona Trushechkina, Hermanna Kampermanna, Michaela Eppinga i Dagmar Bruß vraća preciznu tvrdnju na mjesto. Konstruira verziju kvantne mehanike koja koristi samo realne brojeve i reproducira svako predviđanje standardne kompleksne teorije — uključujući upravo one višečestične eksperimente za koje se govorilo da su isključili realne brojeve. Trik nije u tome da se imaginarni brojevi potajno vrate. Mijenja se jedna pretpostavka o tome kako se odvojeni sistemi kombinuju. Pošten zaključak, riječima autora, jest da kompleksni brojevi nisu nužni za opis kvantne mehanike, ali su svakako vrlo korisni.



Kompleksna amplituda a+bi par je realnih brojeva uz „zastavicu" koja putuje sa svakim sistemom. Realna formulacija nema manje sastojaka — samo ih sprema u drukčiji spremnik, a cijena se pojavljuje u načinu kombinovanja sistema.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Eksperimenti 2021.–22. uporedili su dvije konkretne teorije — standardnu kompleksnu kvantnu mehaniku i realnu „kontrastnu" teoriju koja zadržava pravilo tenzorskog produkta — i rezultat je bio u korist kompleksne. Isključili su tu kontrastnu teoriju, ne realne brojeve u načelu.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Šta kompleksni brojevi rade u teoriji

U kvantnoj mehanici stanje sistema opisuje se amplitudama, a vjerovatnoća ishoda dobiva se kvadriranjem njihove veličine. U standardnoj teoriji te su amplitude kompleksni brojevi: svaki nosi veličinu i fazu, odnosno kut. Ta faza nije ukras. Kada se dva puta prema istom ishodu kombinuju, njihove faze odlučuju hoće li se pojačati ili poništiti — interferencija koja je zaštitni znak kvantnog ponašanja. S druge strane, ukupna faza zajednička cijelom sistemu nikada se ne može izmjeriti.

Kompleksni broj zapravo je samo par realnih brojeva — realni i imaginarni dio — spojen specifičnim pravilima množenja. Prirodno je zato pitati je li to pakujenje bitno. Možete li zadržati dva realna broja, odbaciti kompleksno pakujenje i i dalje imati cijelu kvantnu mehaniku? Pravila množenja ono su što kompleksne brojeve čini nečim više od dvaju brojeva postavljenih jedan uz drugi, pa odgovor nije očit; tu se krije suptilnost.

Šta je rezultat iz 2021. zapravo ustanovio

Renou i saradnici postavili su upravo to pitanje i dali mu oštar, eksperimentalno provjerljiv oblik. Nisu pitali mogu li se realni brojevi igdje pojaviti u kvantnoj teoriji; pitali su može li formulacija s realnim brojevima reproducirati sva predviđanja kompleksne teorije ako se sistemi kombinuju prema određenom pravilu. To pravilo — nazovimo ga pravilom tenzorskog produkta — standardni je recept za opis nekoliko nezavisnih dijelova kao jedne cjeline.

Pod tim su pravilom pronašli scenarij s tri strane koje dijele spregnutost iz dvaju nezavisnih izvora, u kojem realna teorija i kompleksna teorija predviđaju različite, mjerljive korelacije — višečestičnu verziju Bellova testa. Godine 2022. eksperimenti sa supravodljivim sklopovima i fotonima izveli su takve testove. Izmjerene korelacije slagale su se s kompleksnom kvantnom mehanikom i bile nespojive s realnom alternativom.

> **Zašto test treba dva izvora, a ne jedan**
>
> Običan Bellov test koristi jedan izvor koji šalje jedan spregnuti par dvjema osobama, Alice i Bobu. U tom okruženju kvantna mehanika s realnim brojevima može reproducirati potpuno iste korelacije kao kompleksna teorija — dvije su teorije nerazlučive, pa jedan izvor ne može presuditi među njima.
> Argument iz 2021. dobiva snagu dodavanjem drugog, **nezavisnog** izvora. Zamislite tri strane u nizu: Alice, Bob, Charlie. Jedan izvor spreže Alice s Bobom; odvojeni izvor, bez zajedničke prošlosti, spreže Boba s Charliejem. Bob je u sredini i zajedno mjeri svoje dvije čestice, povezujući dvije polovine. Upravo *nezavisnost* dvaju izvora — pretpostavka da su pripremljeni zasebno — odrađuje posao: pod standardnim pravilom tenzorskog produkta za kombinovanje nezavisnih sistema realna teorija ne može reproducirati trostruke korelacije koje kompleksna kvantna mehanika predviđa za tu mrežu, dok test s jednim izvorom ostavlja teorije izjednačenima. Tu su razliku eksperimenti izmjerili.

To je stvaran i čist rezultat. Ali pažljivo primijetite što je upoređeno: standardna kompleksna kvantna teorija s jednom specifičnom realnom teorijom — onom koja zadržava uobičajeno pravilo tenzorskog produkta. Eksperimenti su presudili tom paru, a ne realnim brojevima kao takvima. Novi rad, posuđujući termin iz temelja kvantne teorije, isključenu alternativu naziva onime što jest: *foil theory* — namjerno postavljena kontrastna teorija koju niko ne zastupa kao istinitu, a koja služi da bi eksperiment mogao razlikovati dvije mogućnosti. Njena je vrijednost upravo u tome što je razlučiva: isključivanje takve teorije pokazuje koje su njene pretpostavke radile posao.

Šta novi rad mijenja

Novi rad zadržava gotovo sve, ali mijenja jedan postulat. Umjesto pravila tenzorskog produkta za kombinovanje sistema polazi od zahtjeva lokalnosti za koji autori tvrde da je fizički temeljniji: operacija izvedena samo na jednom podsistemu ne bi smjela imati nikakav mjerljiv učinak na drugi, netaknuti

podsistem.

Iz toga eksplicitno grade kvantnu mehaniku s realnim brojevima. Realni i imaginarni dijelovi uobičajenih amplituda vode se kao dodatni realni stepeni slobode — rad to naziva „zastavicom" pridruženom svakom sistemu — a nemjerljiva globalna faza kompleksne teorije postaje jednako nemjerljiva rotacija u realnoj. Cijena se pojavljuje upravo ondje gdje ju je rezultat iz 2021. smjestio: u načinu kombinovanja sistema. Naivan način lijepljenja tih realnih opisa ne daje čak ni dobro definiran recept, pa konstrukcija umjesto toga grupira opise koji predstavljaju istu fiziku i radi s tim klasama. S tim pravilom kombinovanja realna teorija reproducira svaku očekivanu vrijednost koju predviđa kompleksna teorija — za jedan sistem i za više njih, spregnutih između odvojenih strana. Autori također pokazuju da je konstrukcija u bitnome jedinstvena i ekvivalentna standardnoj kvantnoj mehanici.

Zato višečestični eksperimenti ne mogu razlikovati ovu realnu teoriju od kompleksne, jer se slažu u svakom predviđanju. Raniji eksperimenti nisu podbacili; jednostavno su testirali drugu, restriktivniju realnu teoriju.

Zašto to nije proturječje

Bilo bi lako pročitati ovo kao „eksperimenti iz 2021. bili su pogrešni". Upravo suprotno. Eksperimenti su bili ispravni, a ovaj rad zavisi o tome da jesu: prihvaća svaku izmjerenu korelaciju i pokazuje realnu formulaciju koja ih također proizvodi. Ono što mijenja jest tumačenje — skok od „ova realna teorija je falsificirana" do „realni brojevi nemogući su u kvantnoj mehanici". Taj je skok preskočio pretpostavku koja je obavljala posao.

Rad također ne tvrdi da bi iko trebao napustiti kompleksne brojeve. Njegov je vlastiti sažetak oprezan u oba smjera: kompleksni brojevi nisu strogo nužni i vrlo su korisni. Realna konstrukcija treba dodatnu zastavicu na svakom sistemu i osjetljivije pravilo kombinovanja; kompleksni brojevi sve to pakuju u jedan čist aritmetički objekt. Praktičnost nije nevažna. U fizici je često upravo razlog zašto neki formalizam pobijedi.

Zašto je to važno

Zanimljivo pitanje u pozadini jest što riječ „nužno" znači za fizičku teoriju. Eksperiment može razlikovati dvije teorije kada daju različita predviđanja. Sam po sebi ne može reći da je određeni matematički sastojak jedini mogući spremnik za skup predviđanja — to je pitanje koje teorije postoje i rješava se konstrukcijom, ne mjerenjem. Ovaj rad jest konstrukcija: izlaže alternativu za koju se mislilo da su je eksperimenti isključili.

Rezultat izoštrava i opću razliku koju vrijedi čuvati. „Ova teorija je falsificirana" i „ovaj matematički alat je neizbježan" dvije su različite tvrdnje, a jaz među njima upravo je mjesto gdje se čist eksperimentalni rezultat može pretvoriti u preuveličavanje. Kompleksni brojevi ostaju prirodan i efikasan

jezik kvantne mehanike. Jesu li metafizički nužni zasebno je pitanje, a na to je pitanje zasad odgovor ne.

Kratak sažetak

Prijedlog iz 2021. i eksperimenti iz 2022. pokazali su da kvantna mehanika s realnim brojevima izgrađena na standardnom pravilu tenzorskog produkta za kombinovanje sistema daje drukčija, mjerljiva predviđanja od kompleksne kvantne mehanike, a eksperimenti su favorizirali kompleksnu teoriju. To je široko predstavljeno kao dokaz da su imaginarni brojevi fizički nužni. Novi rad u *Physical Review Lettersu* konstruira kvantnu mehaniku s realnim brojevima na drukčijem postulatu temeljenom na lokalnosti koja reproducira sva predviđanja kompleksne teorije, uključujući višečestične testove — pokazujući da su kompleksni brojevi praktični, a ne strogo nužni. Riječ je o teorijskoj konstrukciji; ona ne ruši ranije eksperimente i ne traži da kvantnu mehaniku u praksi prepišemo bez kompleksnih brojeva.

Provjera bez uljepšavanja

Šta rad pokazuje: Da samodosljedna formulacija kvantne mehanike koja koristi samo realne brojeve može reproducirati svako predviđanje standardne kompleksne teorije, uključujući višečestične Bellove eksperimente, ako je izgrađena na postulatu lokalnosti umjesto na pravilu tenzorskog produkta za kombinovanje sistema.

Šta je vjerovatno, ali nije poenta: Da ovo „opovrgava" rezultate iz 2021.–2022. Ne opovrgava. Prihvaća te eksperimente kao ispravne i reinterpretira njihov opseg: isključili su jednu specifičnu realnu teoriju, onu koja zadržava pravilo tenzorskog produkta, ne realne brojeve u načelu.

Šta ne pokazuje: Da su kompleksni brojevi pogrešni, beskorisni ili vrijedni odbacivanja u praksi — rad ih izričito naziva vrlo korisnima. Ovo također nije novi eksperiment: nisu prikupljeni novi podaci; tvrdnja je matematička konstrukcija i dokaz konzistentnosti.

Glavna ograničenja za općeg čitaoca: Argument zavisi o tome koju pretpostavku smatrate fizički temeljnijom — pravilo tenzorskog produkta ili postulat lokalnosti. To je argumentiran izbor u tekućoj raspravi o temeljima, ne činjenica fiksirana mjerenjem, a realna konstrukcija može se činiti manje prirodnom od kompleksne kojoj je ekvivalentna.

Koliko povjerenja treba imati opći čitalac? Visoko da je konstrukcija matematički konzistentna — recenzirana je i logika joj je provjerljiva. Treba vjerovati skromnom zaključku: kompleksni brojevi praktičan su jezik kvantne mehanike, ne dokazano metafizički nužan sastojak. Naslove tipa „imaginarni brojevi su stvarni" treba tretirati kao slogan koji je ovaj rad upravo ispravio.

Izvori

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