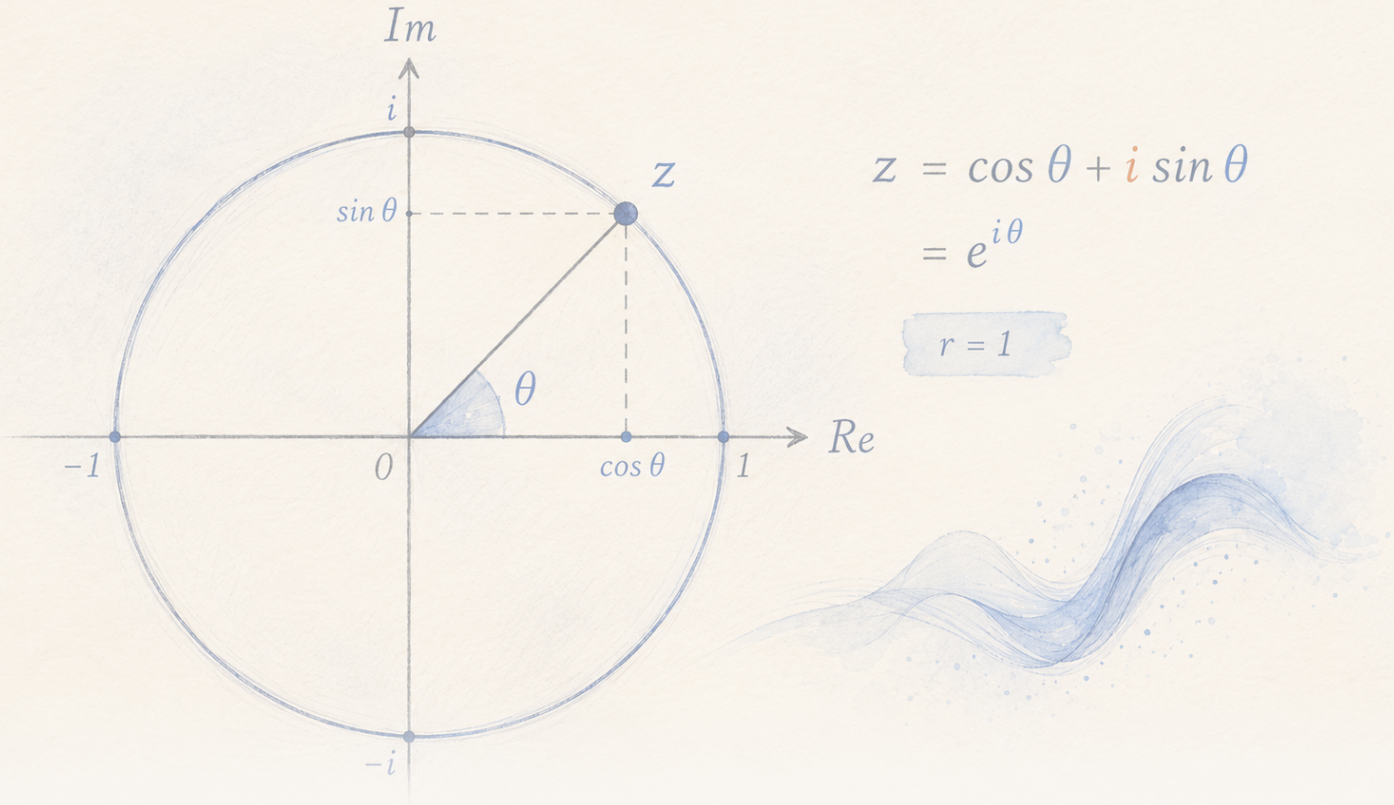


The Clean Paper

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

Kvantna mehanika može se zapisati samo realnim brojevima — kvaka je u načinu kombinovanja sistema

Godine 2021. široko je odjeknuo rezultat prema kojem se verzija kvantne mehanike s realnim brojevima može eksperimentalno falsificirati, a eksperimenti iz 2022. slagali su se sa standardnom kompleksnom kvantnom teorijom. To se često predstavljalo kao dokaz da su imaginarni brojevi fizički stvarni. Novi rad u Physical Review Lettersu izoštrava tvrdnju: izgradite realnu formulaciju na drukčijoj, argumentirano fizičkijoj pretpostavci o načinu kombinovanja odvojenih sistema i ona reproducira svako predviđanje kompleksne kvantne mehanike, uključujući višečestične testove. Pošteno čitanje jest da su kompleksni brojevi praktični, a ne strogo nužni — i da su raniji eksperimenti isključili jednu određenu realnu teoriju, ne realne brojeve u principu. To je rezultat iz osnova teorije na papiru, ne novo merenje, i ne traži da iko prestane koristiti kompleksne brojeve.

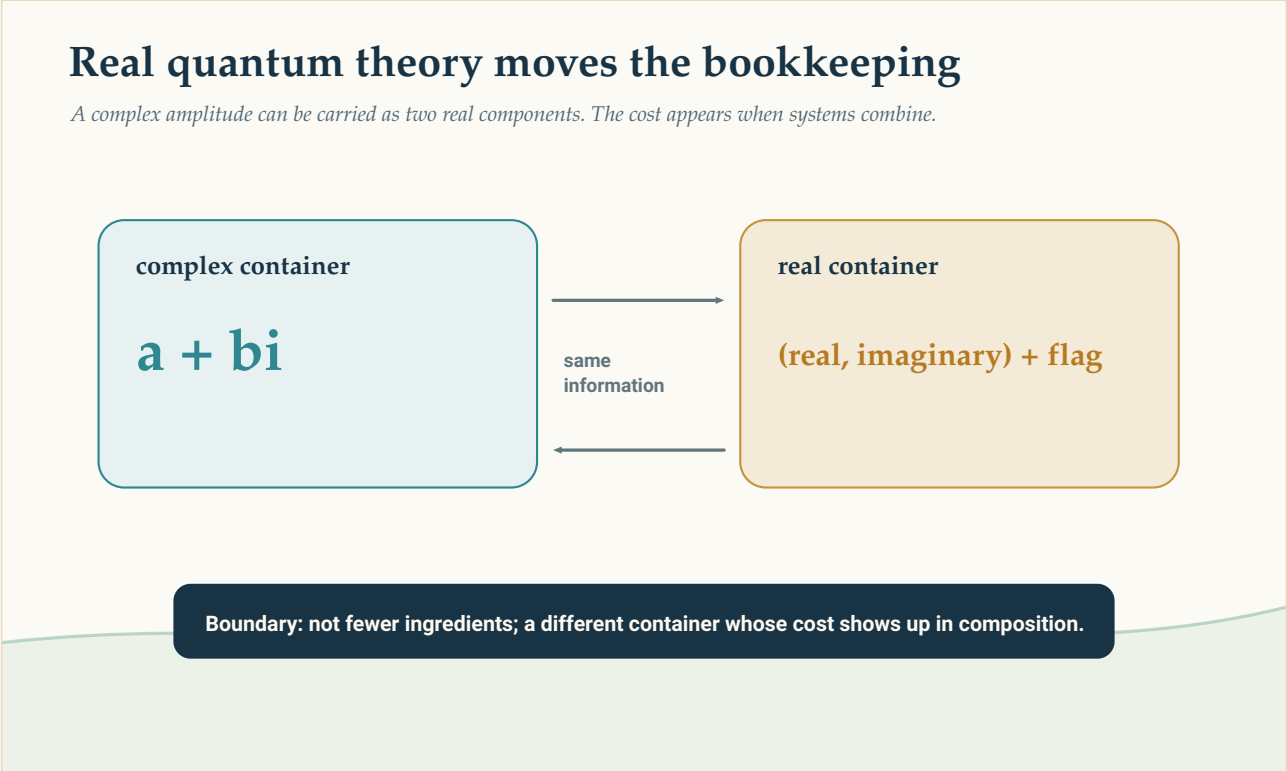
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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 vredi pročitati još jednom

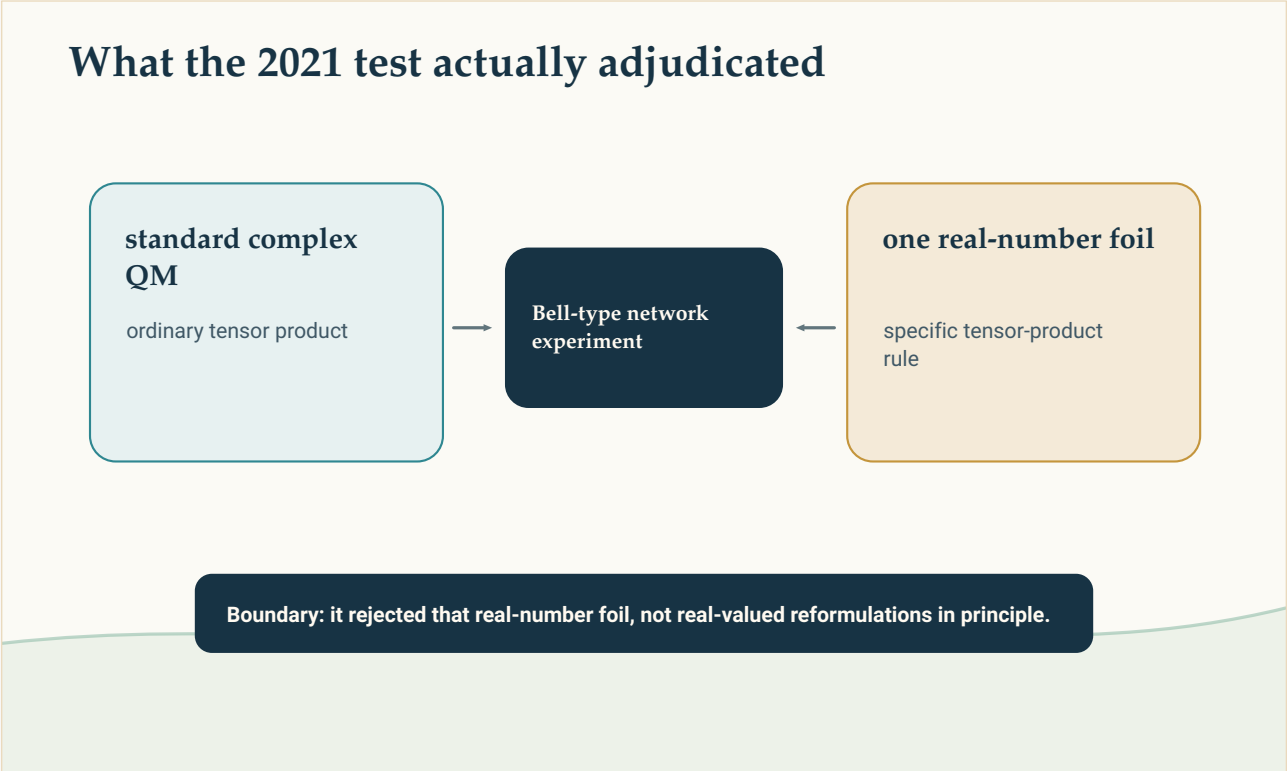
Pre nekoliko godina kružila je upečatljiva tvrdnja: eksperimenti su pokazali da su imaginarni brojevi fizički stvarni, da kvantna mehanika bez njih nije moguća. Tvrdnja je proizašla iz stvarne i pažljivo napravljene fizike — predloga iz 2021. Marca-Oliviera Renoua i saradnika u *Natureu* te eksperimenata 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 mesto. Konstruiše 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. Menja se jedna pretpostavka o tome kako se odvojeni sistemi kombinuju. Pošten zaključak, rečima autora, je 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 drugačiji rezervoar, a cena se pojavljuje u načinu kombinovanja sistema.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Eksperimenti 2021.–22. uporedili su dve 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 principu.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Šta kompleksni brojevi rade u teoriji

U kvantnoj mehanici stanje sistema opisuje se amplitudama, a verovatnoća ishoda dobija 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 celom sistemu nikada se ne može izmeriti.

Kompleksni broj zapravo je samo par realnih brojeva — realni i imaginarni deo — spojen specifičnim pravilima množenja. Prirodno je zato pitati da li je to pakovanje bitno. Možete li zadržati dva realna broja, odbaciti kompleksno pakovanje i i dalje imati celu 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 proverljiv 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 delova kao jedne celine.

Pod tim su pravilom pronašli scenarij s tri strane koje dele spregnutost iz dvaju nezavisnih izvora, u kojem realna teorija i kompleksna teorija predviđaju različite, merljive korelacije — višečestičnu verziju Bellova testa. Godine 2022. eksperimenti sa supravodljivim sklopovima i fotonima izveli su takve testove. Izmerene 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 — dve su teorije nerazlučive, pa jedan izvor ne može presuditi među njima.
> Argument iz 2021. dobija 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 meri svoje dve čestice, povezujući dve 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 izmerili.

To je stvaran i čist rezultat. Ali pažljivo primetite 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 osnova kvantne teorije, isključenu alternativu naziva onime što je: *foil theory* — namerno postavljena kontrastna teorija koju niko ne zastupa kao istinitu, a koja služi da bi eksperiment mogao razlikovati dve mogućnosti. Njena je vrednost upravo u tome što je razlikuje: isključivanje takve teorije pokazuje koje su njene pretpostavke radile posao.

Šta novi rad menja

Novi rad zadržava gotovo sve, ali menja jedan postulat. Umesto pravila tenzorskog produkta za kombinovanje sistema polazi od zahteva lokalnosti za koji autori tvrde da je fizički osnovniji: operacija izvedena samo na jednom podsistemu ne bi smela imati nikakav merljiv efekat na drugi, netaknuti

podsistem.

Iz toga eksplicitno grade kvantnu mehaniku s realnim brojevima. Realni i imaginarni delovi uobičajenih amplituda nose se kao dodatno realno knjigovodstvo — rad to naziva „zastavicom” pridruženom svakom sistemu — a nemerljiva globalna faza kompleksne teorije postaje jednako nemerljiva rotacija u realnoj. Cena se pojavljuje upravo tamo gde ju je rezultat iz 2021. smestio: u načinu kombinovanja sistema. Naivan način lepljenja tih realnih opisa ne daje čak ni dobro definisan recept, pa konstrukcija umesto toga grupiše opise koji predstavljaju istu fiziku i radi s tim klasama. S tim pravilom kombinovanja realna teorija reproducira svaku očekivanu vrednost koju predviđa kompleksna teorija — za jedan sistem i za više njih, spregnutih između odvojenih strana. Autori takođe 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 protivrečnost

Bilo bi lako pročitati ovo kao „eksperimenti iz 2021. bili su pogrešni”. Upravo suprotno. Eksperimenti su bili ispravni, a ovaj rad zavisi od toga da jesu: prihvaća svaku izmerenu korelaciju i pokazuje realnu formulaciju koja ih takođe proizvodi. Ono što menja je 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 takođe ne tvrdi da bi iko trebao napustiti kompleksne brojeve. Njegov je sopstveni rezime oprezan u oba smera: kompleksni brojevi nisu strogo nužni i vrlo su korisni. Realna konstrukcija treba dodatnu zastavicu na svakom sistemu i osetljivije pravilo kombinovanja; kompleksni brojevi sve to pakuju u jedan čist aritmetički objekt. Praktičnost nije nevažna. U fizici je često upravo razlog zašto neki formalizam pobedi.

Zašto je to važno

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

Rezultat izoštrava i opštu razliku koju vredi čuvati. „Ova teorija je falsificirana” i „ovaj matematički alat je neizbežan” dve su različite tvrdnje, a jaz među njima upravo je mesto gde se čist eksperimentalni rezultat može pretvoriti u preuveličavanje. Kompleksni brojevi ostaju prirodan i efikasan jezik kvantne mehanike. Da li su metafizički nužni zasebno je pitanje, a na to je pitanje zasad odgovor ne.

Kratak rezime

predlog iz 2021. i eksperimenti iz 2022. pokazali su da kvantna mehanika s realnim brojevima izgrađena na standardnom pravilu tenzorskog produkta za kombinovanje sistema daje drugačija, merljiva 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* konstruiše kvantnu mehaniku s realnim brojevima na drukčijem postulatu zasnovanom na lokalnosti koja reproducira sva predviđanja kompleksne teorije, uključujući višečestične testove — pokazujući da su kompleksni brojevi praktični, a ne strogo nužni. Reč je o teorijskoj konstrukciji; ona ne ruši ranije eksperimente i ne traži da kvantnu mehaniku u praksi prepišemo bez kompleksnih brojeva.

Provera bez ulepšavanja

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 umesto na pravilu tenzorskog produkta za kombinovanje sistema.

Šta je verovatno, 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 principu.

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

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

Koliko poverenja treba imati opšti čitalac? Visoko da je konstrukcija matematički konzistentna — recenzirana je i logika joj je proverljiva. Treba verovati 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