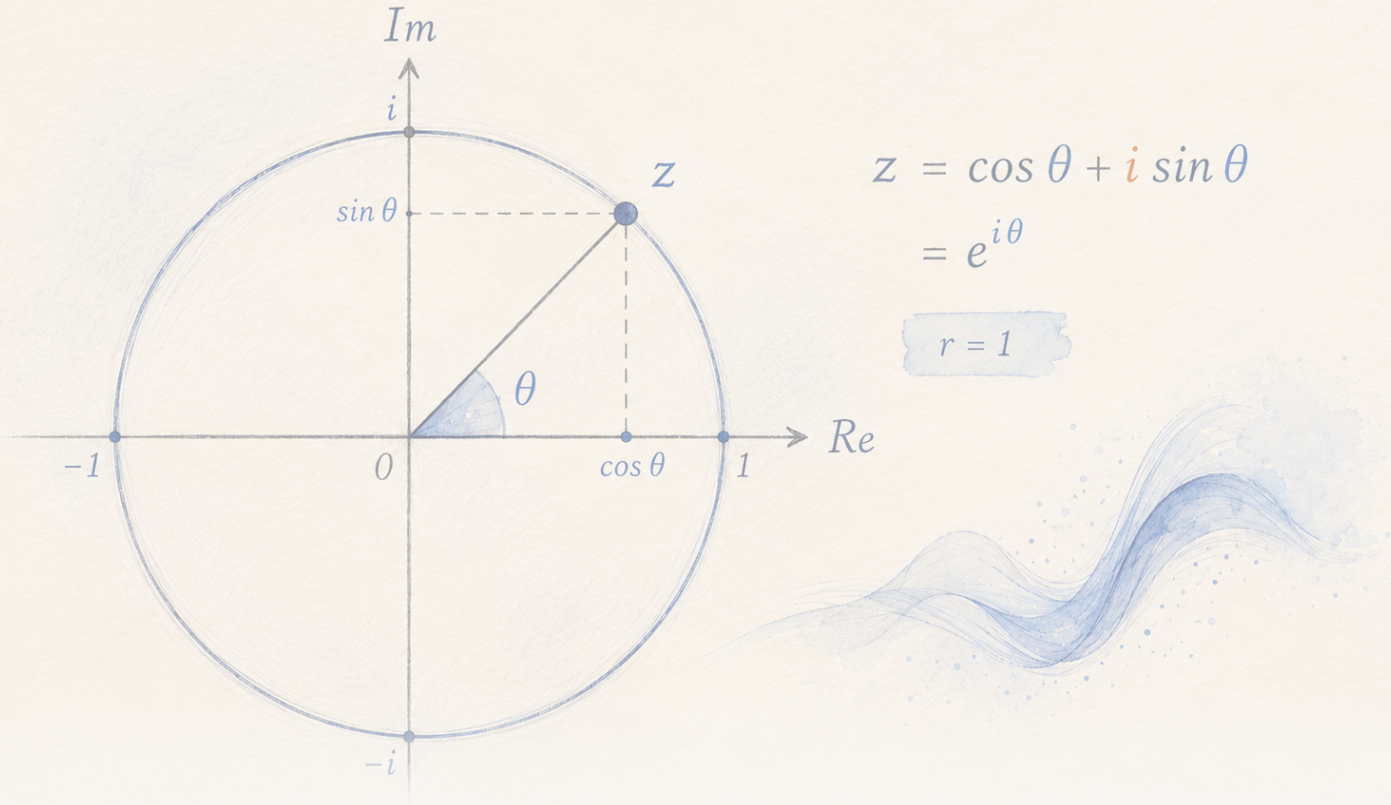


The Clean Paper

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

Kvantmehaanikat saab kirjutada ainult reaalarvudega — konks peitub süsteemide ühendamises

2021. aastal väitis laialt kajastatud tulemus, et kvantmehaanika reaalarvuline versioon on katseliselt falsifitseeritav, ning 2022. aasta katsed toetasid standardset kompleksarvulist kvantteooriat. Seda esitleti sageli tõendina, et imaginaararvud on füüsikaliselt reaalsed. Uus Physical Review Lettersi artikkel täpsustab väidet: kui reaalarvuline sõnastus rajada teistsugusele, väidetavalt füüsikalisemalt põhjendatud eeldusele selle kohta, kuidas eraldi süsteeme ühendatakse, taastoodab see kõik kompleksarvulise kvantmehaanika ennustused, sealhulgas mitme osapoolega testid. Aus lugemine on, et kompleksarvud on mugavad, mitte rangelt hädavajalikud — ja varasemad katsed välistasid ühe kindla reaalarvulise teooria, mitte reaalarvud põhimõtteliselt. See on teoreetiline fundamentide tulemus, mitte uus mõõtmine, ega palu kellelgi kompleksarvudest loobuda.

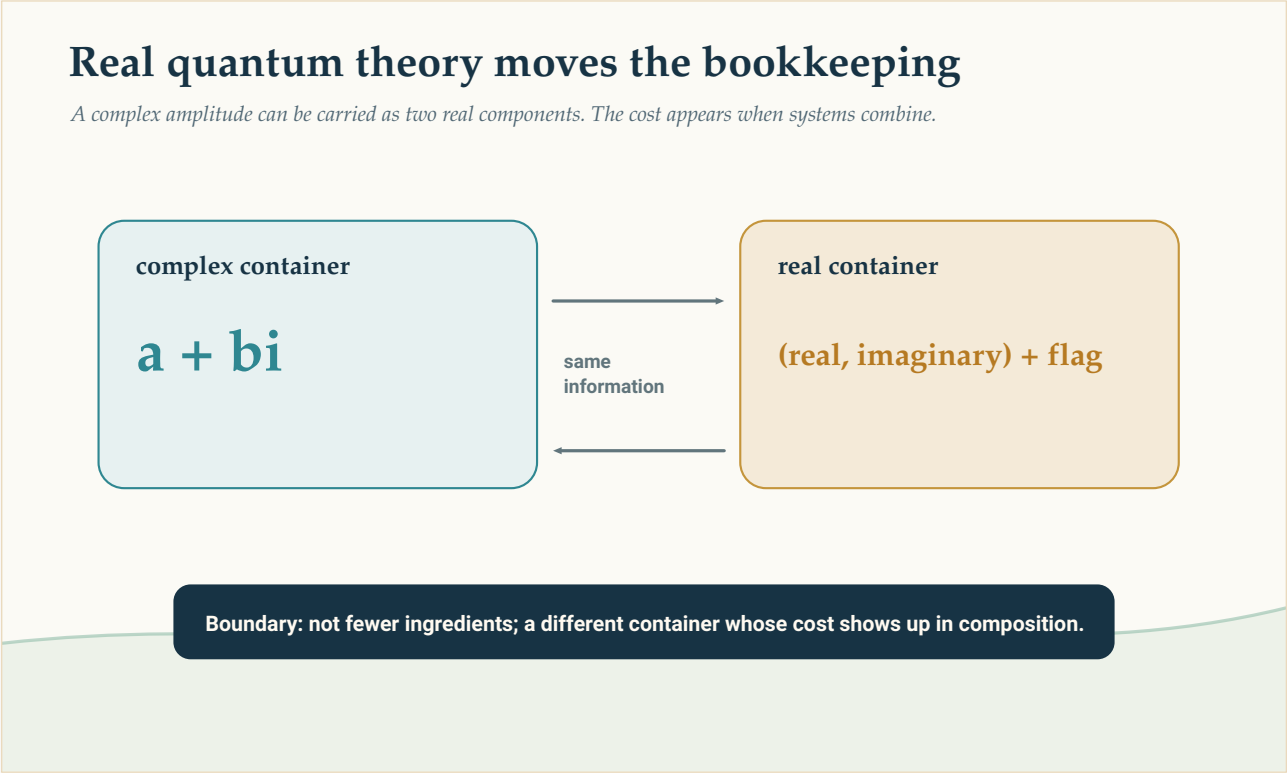
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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

Pealkiri, mida tasub uuesti lugeda

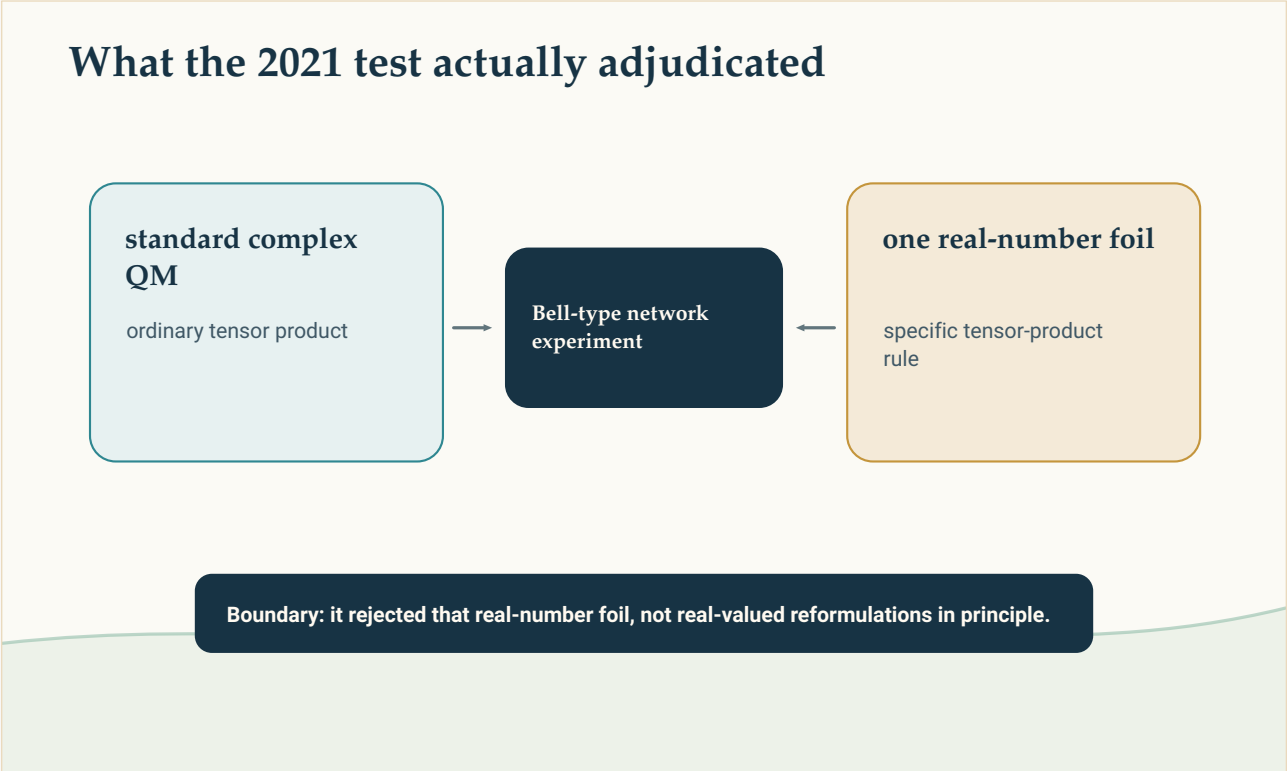
Mõni aasta tagasi hakkas ringi liikuma rabav väide: katsed olevat näidanud, et imaginaararvud on füüsikaliselt reaalsed ning kvantmehaanikat ei saa ilma nendeta kirja panna. Väide kasvas välja päris ja hoolikalt tehtud füüsikast — Marc-Olivier Renou ja kolleegide 2021. aasta ettepanekust ajakirjas *Nature* ning 2022. aasta katsetest, mis selle ellu viisid. Ent populaarne versioon surus täpse väite lööklauseks ja lööklause oli tulemusest tugevam.

Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkini, Hermann Kampermanni, Michael Eppingu ja Dagmar Brußi uus artikkel ajakirjas *Physical Review Letters* taastab selle täpsuse. Autorid konstrueerivad kvantmehaanika versiooni, mis kasutab ainult reaalarve ja taastoodab standardse kompleksarvulise teooria kõik ennustused — sealhulgas just need mitme osapoolega katsed, mille kohta öeldi, et need välistasid reaalarvud. Nipp ei seisne imaginaararvude salaja tagasitoomises. Muudetakse üht eeldust selle kohta, kuidas eraldi süsteeme omavahel ühendatakse. Autorite endi sõnastuses on aus järeldus see, et kompleksarvud ei ole kvantmehaanika kirjeldamiseks hädavajalikud, kuid nad on kindlasti väga kasulikud.



Kompleksamplituud a+bi on kahe reaalarvu paar, mille kõrval kannab iga süsteem „lippu“. Reaalarvuline sõnastus ei kasuta vähem koostisosi — need on lihtsalt teise kujuga pakendis ning hind tuleb välja selles, kuidas süsteeme ühendatakse.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



2021.–22. aasta katsed võrdlesid kahte konkreetset teooriat — standardset kompleksarvulist kvantmehaanikat ja üht reaalarvulist „võrdlusteooriat“, mis säilitab tensorprodukti reegli — ning tulemus toetas kompleksarvulist varianti. Välistati see võrdlusteooria, mitte reaalarvud põhimõtteliselt.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Mida kompleksarvud teoorias teevad

Kvantmehaanikas kirjeldatakse süsteemi olekut amplituudidega ning mingi tulemuse tõenäosuse saamiseks võetakse amplituudi suuruse ruut. Standardteoorias on need amplituudid kompleksarvud: igaühel on suurus ja faas ehk nurk. Faas ei ole kaunistus. Kui kaks teed sama tulemuseni liituvad, määravad nende faasid, kas nad võimendavad või kustutavad teineteist — see interferents on kvantkäitumise üks tunnusjooni. Kogu süsteemile ühine üldfaas seevastu ei ole kunagi mõõdetav.

Kompleksarv on sisuliselt kahe reaalarvu — reaal- ja imaginaarosa — paar koos konkreetsete korrutamisreeglitega. Seega tekib loomulik küsimus, kas just see pakend on hädavajalik. Kas võiksime jätta alles kaks reaalarvu, loobuda kompleksarvulisest vormist ja säilitada siiski kogu kvantmehaanika? Just korrutamisreeglid teevad kompleksarvudest midagi enamat kui kaks kõrvuti seisvat arvu, mistõttu vastus ei ole ilmne — ja siin peitubki nüanss.

Mida 2021. aasta tulemus tegelikult näitas

Renou ja kolleegid esitasid just selle küsimuse teravas, katseliselt kontrollitavas vormis. Nad ei küsinud, kas reaalarvud võivad kvantteoorias üldse esineda; nad küsisid, kas reaalarvuline sõnastus suudab taastoota kõik kompleksarvulise teooria ennustused juhul, kui süsteemide ühendamiseks kasutatakse kindlat reeglit. See reegel — nimetagem seda tensorprodukti reegliks — on tavapärane viis kirjeldada mitut sõltumatut osa ühe tervikuna.

Selle reegli korral leidsid nad olukorra, kus kolm osapoolt jagavad põimumist kahest sõltumatust allikast ning reaalarvuline ja kompleksarvuline teooria ennustavad erinevaid, mõõdetavaid korrelatsioone — sisuliselt Belli testi mitme osapoolega versiooni. 2022. aastal tehti sellised katsed nii ülijuhtivate ahelatega kui ka footonitega. Mõõdetud korrelatsioonid sobisid kompleksarvulise kvantmehaanikaga ja ei sobinud reaalarvulise alternatiiviga.

> **Miks on testis vaja kahte allikat, mitte üht**
>
> Tavalises Belli testis saadab üks allikas ühe põimunud osakestepaari kahele inimesele, Alice'ile ja Bobile. Sellises ülesehituses suudab reaalarvuline kvantmehaanika taastoota täpselt samad korrelatsioonid nagu kompleksarvuline teooria — neid ei saa eristada ja üks allikas ei võimalda nende vahel otsustada.
>
> 2021. aasta argument saab jõu juurde teise, **sõltumatu** allika lisamisest. Kujutlege kolme osapoolt reas: Alice, Bob ja Charlie. Üks allikas põimib Alice'i Bobiga; teine, esimesega ühist minevikku mitte jagav allikas põimib Bobi Charliega. Bob on keskel ja mõõdab oma kahte osakest koos, ühendades kaks poolt. Tööd teeb just kahe allika *sõltumatus* — eeldus, et need valmistati ette eraldi. Sõltumatute süsteemide ühendamise standardse tensorprodukti reegli korral ei suuda reaalarvuline teooria taastoota kolmik-korrelatsioone, mida kompleksarvuline kvantmehaanika selle võrgu jaoks ennustab, samal ajal kui ühe allikaga test jätab teooriad viiki. Just seda erinevust katsed mõõtsid.

See on päris ja selge tulemus. Kuid tasub tähele panna, mida täpselt võrreldi: standardset kompleksarvulist kvantteooriat ühe konkreetse reaalarvulise teooriaga — sellega, mis säilitab tavapärase tensorprodukti reegli. Katsed otsustasid selle paari, mitte reaalarvude endi üle. Uus artikkel kasutab kvantfundamentide terminoloogiat ja nimetab välistatud alternatiivi selleks, mis see on: *foil theory* ehk tahtlik võrdlusteooria — teooria, mida keegi ei esita tõena, vaid mis seatakse aktsepteeritud teooriale teadlikult kõrvale, et katse saaks neid eristada. Selle väärtus ongi eristatavuses: võrdlusteooria välistamine näitab, millised selle reaalarvulise teooria eeldused tegelikult määravaks osutusid.

Mida uus artikkel muudab

Uus töö jätab peaaegu kõik alles ja muudab ühe postulaadi. Süsteemide ühendamise tensorprodukti reegli eeldamise asemel lähtutakse lokaalsuse nõudest, mida autorid peavad füüsikaliselt fundamentaalsemaks: ühe alamsüsteemiga tehtud operatsioon ei tohiks teisele, puutumata alamsüsteemile

avaldada mõõdetavat mõju.

Sellest lähtepunktist ehitavad nad reaalarvulise kvantmehaanika otseselt üles. Tavaliste amplituudide reaal- ja imaginaarosad kantakse kaasa täiendava reaalarvulise arvestusena — artikkel nimetab seda iga süsteemi külge kinnitatud „lipuks“ — ning kompleksarvulise teooria mõõdetamatu globaalne faas muutub reaalarvulises versioonis samavõrd mõõdetamatuks pöördeks. Hind ilmub täpselt sinna, kuhu 2021. aasta tulemus selle paigutas: süsteemide ühendamise viisi. Nende reaalarvuliste kirjelduste naiivne kokkuliitmine ei anna isegi hästi määratletud retsepti, seega rühmitab konstruktsioon omavahel kirjeldused, mis esindavad sama füüsikat, ja töötab nende klassidega. Sellise ühendamisreegliga taastoodab reaalarvuline teooria kõik kompleksarvulise teooria ennustatud keskväärtused — nii ühe süsteemi kui ka paljude, ruumiliselt lahutatud osapoolte vahel põimunud süsteemide korral. Autorid näitavad ka, et konstruktsioon on sisuliselt ainulaadne ja standardse kvantmehaanikaga ekvivalentne.

Seega ei suuda mitme osapoolega katsed seda reaalarvulist teooriat kompleksarvulisest eristada, sest kõik nende ennustused langevad kokku. Varasemad katsed ei ebaõnnestunud; nad kontrollisid lihtsalt teistsugust ja piiravamat reaalarvulist teooriat.

Miks see ei ole vastuolu

Seda oleks lihtne lugeda nii, et „2021. aasta katsed olid valed“. Vastupidi. Katsed olid õiged ja uus artikkel sõltub nende õigsusest: see aktsepteerib kõiki mõõdetud korrelatsioone ning näitab reaalarvulist sõnastust, mis neid samuti toodab. Muudetakse tõlgendust — hüpet väitest „see reaalarvuline teooria on falsifitseeritud“ väiteni „reaalarvud on kvantmehaanikas võimatud“. Selles hüppes jäi märkamatuks eeldus, mis tulemust tegelikult kandis.

Samuti ei väida artikkel, et kompleksarvudest tuleks loobuda. Autorite enda kokkuvõte on mõlemalt poolt ettevaatlik: kompleksarvud ei ole rangelt hädavajalikud ja nad on väga kasulikud. Reaalarvuline konstruktsioon vajab iga süsteemi jaoks lisalippu ning peenemat süsteemide ühendamise reeglit; kompleksarvud pakivad kogu selle töö üheks puhtaks aritmeetiliseks struktuuriks. Mugavus ei ole tühiasi. Füüsikas on see sageli põhjus, miks üks formalism peale jääb.

Miks see oluline on

Selle all peituv huvitav küsimus on, mida tähendab füüsikateooria jaoks sõna „vajalik“. Katse suudab eristada kaht teooriat, kui need ennustavad erinevaid asju. Katse üksi ei saa aga näidata, et mingi konkreetne matemaatiline koostisosa on ainus võimalik raamistik samade ennustuste jaoks — see on küsimus selle kohta, millised teooriad üldse eksisteerivad, ja sellele vastatakse konstruktsiooni, mitte mõõtmisega. See artikkel ongi konstruktsioon: see esitab alternatiivi, mille katsed arvati olevat välistanud.

Tulemus teravdab ka üldisemat vahet, mida tasub meeles pidada. „See teooria on falsifitseeritud“

ja „see matemaatiline tööriist on vältimatu“ on erinevad väited ning just nende vahele võib puhas eksperimentaalne tulemus muutuda ümberjutustamisel liialduseks. Kompleksarvud jäävad kvantmehaanika loomulikuks ja tõhusaks keeleks. Kas nad on metafüüsiliselt nõutavad, on eraldi küsimus — ja sellele on praegu vastus ei.

Lühidalt

2021. aasta ettepanek ja 2022. aasta katsed näitasid, et süsteemide ühendamise standardsele tensorprodukti reeglile rajatud reaalarvuline kvantmehaanika annab kompleksarvulisest kvantmehaanikast erinevaid, kontrollitavaid ennustusi ning katsed toetasid kompleksarvulist teooriat. Seda kajastati laialt kui tõendit, et imaginaararvud on füüsikaliselt vältimatud. Uus *Physical Review Lettersi* artikkel konstrueerib reaalarvulise kvantmehaanika teistsugusele, lokaalsusel põhinevale postulaadile ning taastoodab kompleksarvulise teooria kõik ennustused, sealhulgas mitme osapoolega testid — näidates, et kompleksarvud on pigem mugavad kui rangelt hädavajalikud. Tegemist on teoreetilise konstruktsiooniga; see ei lükka varasemaid katseid ümber ega kutsu kvantmehaanikat praktikas ümber sõnastama.

Kaine hinnang

Mida artikkel näitab: Ainult reaalarve kasutav sisemiselt kooskõlaline kvantmehaanika sõnastus võib taastoota standardse kompleksarvulise teooria kõik ennustused, sealhulgas mitme osapoolega Belli-tüüpi katsed, kui see rajatakse süsteemide ühendamise tensorprodukti reegli asemel lokaalsuse postulaadile.

Mis on mõeldav, kuid pole asja tuum: Et see „lükkab ümber“ 2021.–2022. aasta tulemused. Ei lükka. Artikkel võtab need katsed õigena ja tõlgendab nende ulatust uuesti: need välistasid ühe konkreetse reaalarvulise teooria, mis säilitas tensorprodukti reegli, mitte reaalarvud põhimõtteliselt.

Mida see ei näita: Et kompleksarvud on valed, kasutud või et neist tasuks praktikas loobuda — artikkel nimetab neid selgelt väga kasulikuks. See pole ka uus eksperiment: uusi andmeid ei mõõdetud; väide põhineb matemaatilisel konstruktsioonil ja kooskõlalisuse tõestusel.

Peamised piirangud tavalugeja jaoks: Argument sõltub sellest, kumba eeldust pidada füüsikaliselt fundamentaalsemaks — tensorprodukti reeglit või lokaalsuse postulaati. See on põhjendatud valik käimasolevas kvantfundamentide vaidluses, mitte mõõtmisega lukku pandud fakt, ning reaalarvuline konstruktsioon on vaieldamatult vähem loomulik kui kompleksarvuline formalism, mida ta jäljendab.

Kui kindel võiks tavalugeja olla? Väga kindel, et konstruktsioon on matemaatiliselt kooskõlaline — artikkel on eelretsenseeritud ja selle loogikat saab kontrollida. Usaldada tasub tagasihoidlikku järeldust: kompleksarvud on kvantmehaanika mugav keel, mitte tõestatud metafüüsiline hädavajadus. Pealkirju stiilis „imaginaararvud on reaalsed“ tasub võtta just sellise lööklausena, mida see artikkel

püüab parandada.

Allikad

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