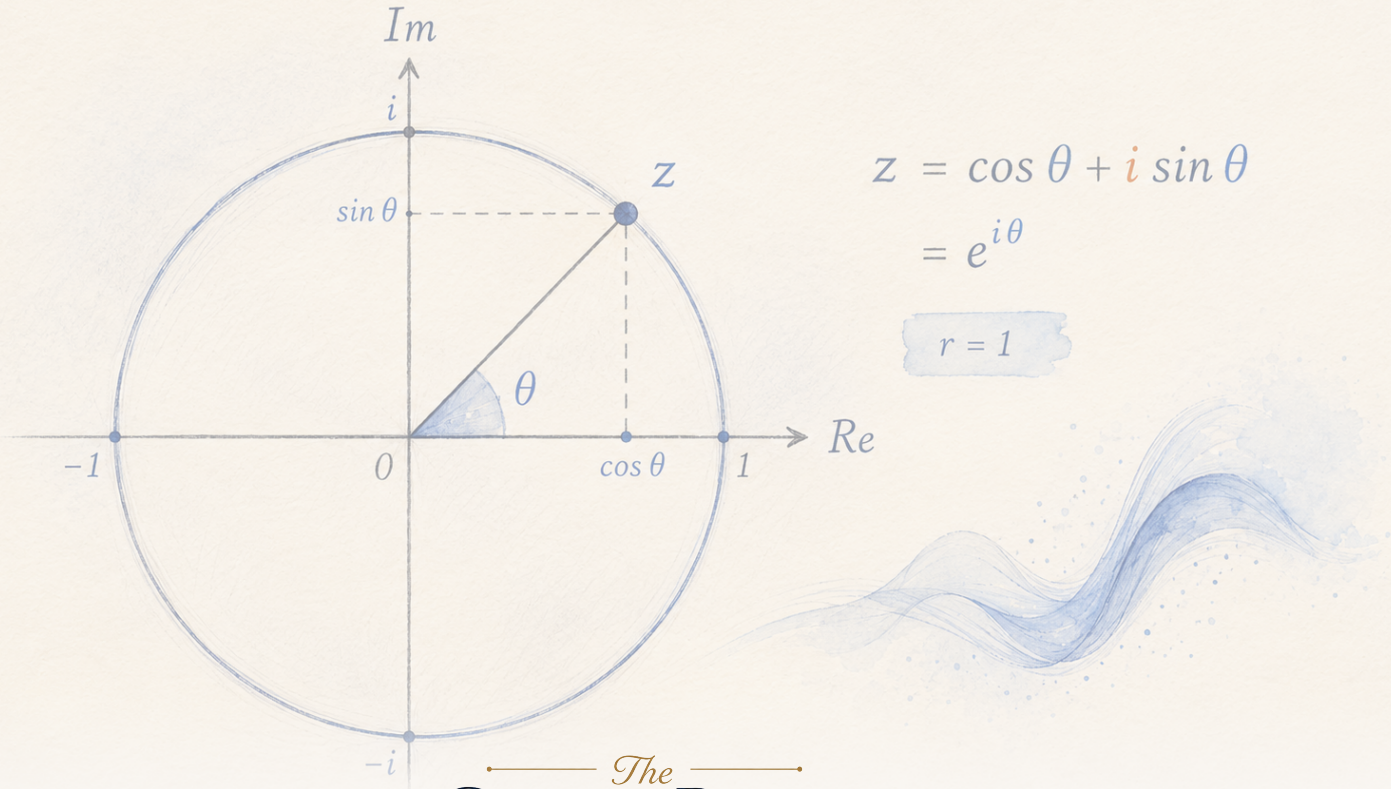


The Clean Paper

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

Kvanttimekaniikan voi kirjoittaa pelkillä reaaliluvuilla — hankala kohta on järjestelmien yhdistäminen

Vuonna 2021 laajasti uutisoitu tulos esitti, että reaalilukuihin perustuva kvanttimekaniikka voitaisiin kumota kokeellisesti, ja vuoden 2022 jatkokokeet tukivat tavallista kompleksilukuista kvanttiteoriaa. Tämä otsikoitiin usein todisteeksi siitä, että imaginaariluvut ovat fyysisesti todellisia. Uusi Physical Review Letters -artikkeli tarkentaa väitettä: kun reaalilukuformalisaatio rakennetaan erilaiselle, mahdollisesti fysikaalisemmalle oletukselle siitä, miten erilliset järjestelmät yhdistyvät, se tuottaa kaikki kompleksisen kvanttimekaniikan ennusteet, myös monen osapuolen testit. Rehellinen tulkinta on, että kompleksiluvut ovat käteviä eivätkä ehdottoman välttämättömiä — ja että aiemmat kokeet sulkivat pois yhden tietyn reaaliteorian, eivät reaalilukuja periaatteessa. Tämä on teoreettinen perustulos paperilla, ei uusi mittaus, eikä se pyydä ketään luopumaan kompleksiluvuista.

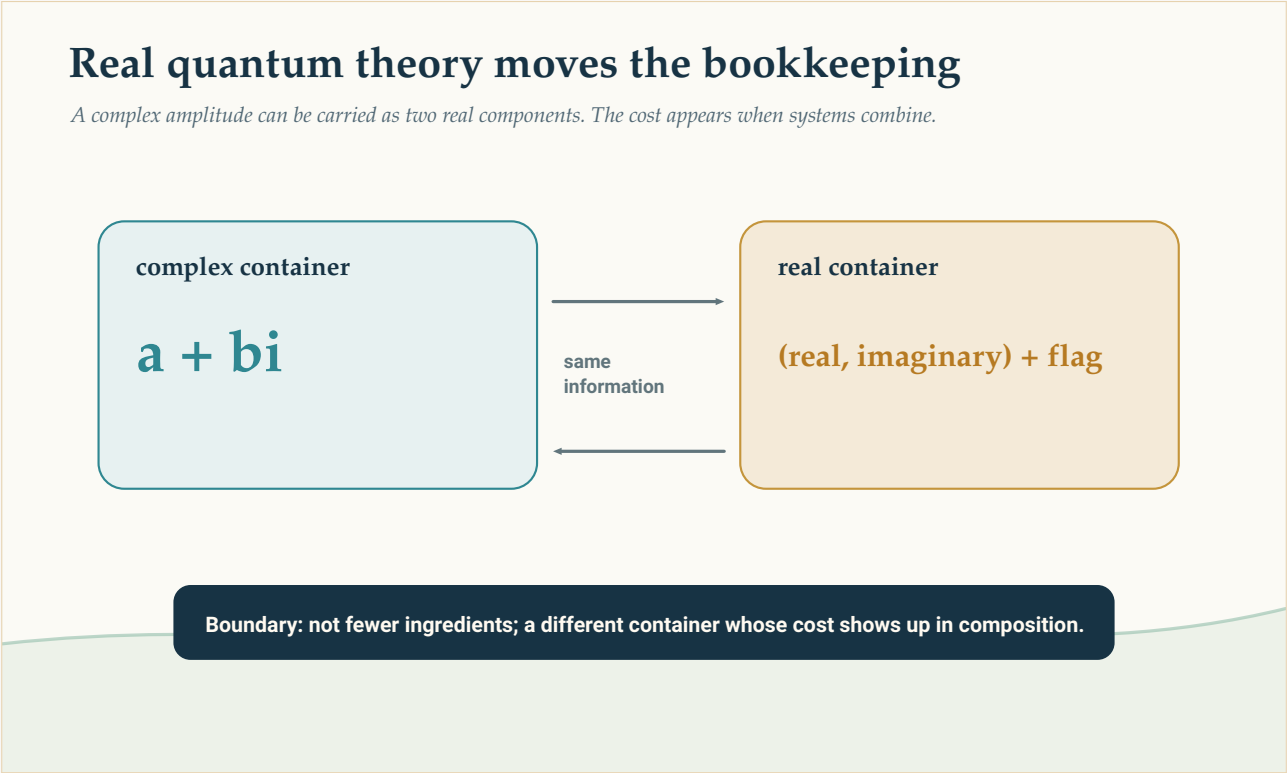
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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

Otsikko, joka kannattaa lukea uudelleen

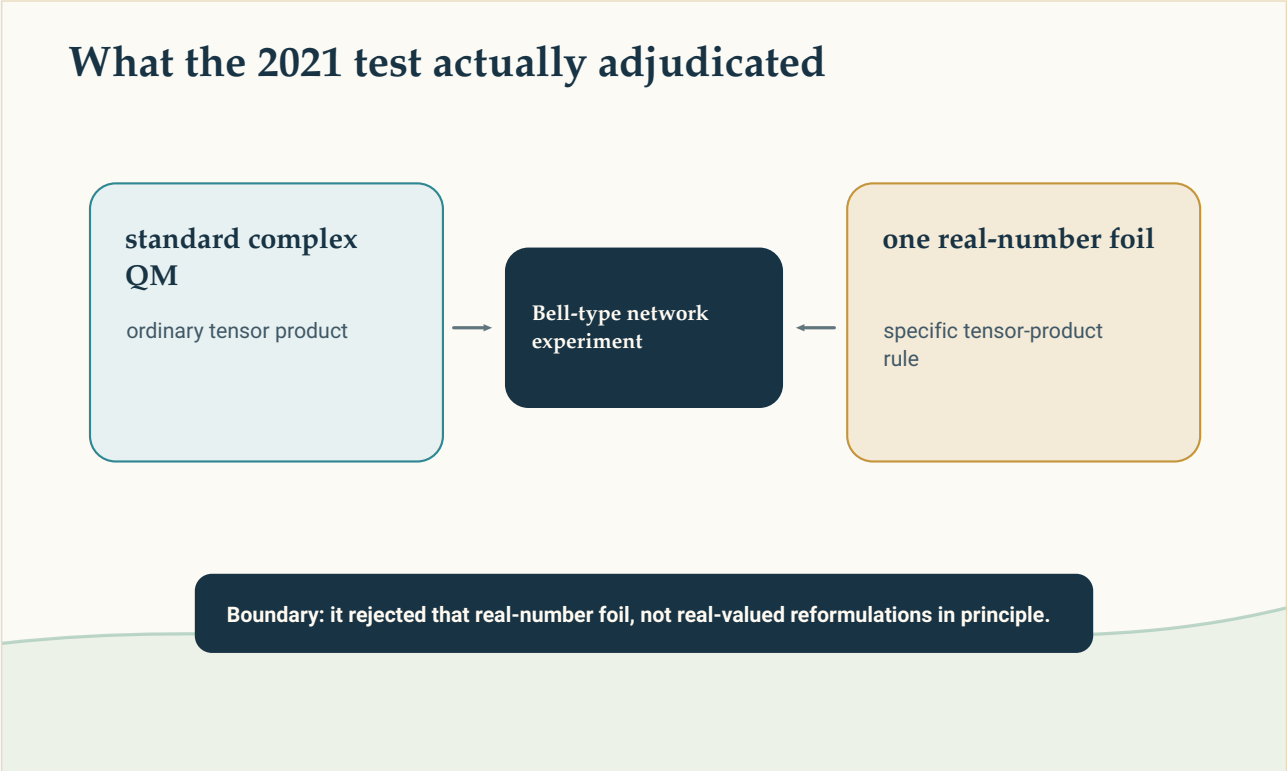
Muutama vuosi sitten levisi näyttävä väite: kokeet olivat osoittaneet imaginaarilukujen olevan fyysisesti todellisia ja että kvanttimekaniikkaa ei voi kirjoittaa ilman niitä. Väite kasvoi aidosta ja huolellisesta fysiikasta — Marc-Olivier Renoun ja kollegoiden vuoden 2021 Nature-ehdotuksesta sekä sitä toteuttaneista vuoden 2022 kokeista. Mutta suosittu versio puristi täsmällisen väitteen iskulauseeksi, ja iskulause oli tulosta vahvempi.

Pedro Barrios Hitan, Anton Trushechkinin, Hermann Kampermannin, Michael Eppingin ja Dagmar Brußin uusi *Physical Review Letters* -artikkeli palauttaa täsmällisen väitteen paikalleen. Se rakentaa kvanttimekaniikan version, joka käyttää vain reaalilukuja ja tuottaa kaikki tavallisen kompleksisen teorian ennusteet — myös juuri ne monen osapuolen kokeet, joiden sanottiin sulkeneen reaaliluvut pois. Temppu ei ole imaginaarilukujen ujuttaminen takaisin. Se on yhden oletuksen muuttaminen siitä, miten erilliset järjestelmät yhdistetään. Kirjoittajien omin sanoin rehellinen johtopäätös on, etteivät kompleksiluvut ole välttämättömiä kvanttimekaniikan kuvaamiseen, mutta ne ovat varmasti erittäin hyödyllisiä.



Kompleksinen amplitudi a+bi on reaalilukupari, ja reaalisessa esityksessä järjestelmän rinnalla kulkee lisäksi ”lippu”. Reaalinen formalismi ei käytä vähemmän aineksia — vain eri säiliötä, jonka hinta näkyy siinä, miten järjestelmät yhdistetään.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Vuosien 2021–22 kokeissa verrattiin kahta tiettyä teoriaa — tavallista kompleksista kvanttimekaniikkaa ja reaalista "vertailuteoriaa", joka säilyttää tensoritulosäännön — ja tulos osui kompleksisen teorian puolelle. Ne sulkivat pois tämän vertailuteorian, eivät reaalilukuja periaatteessa.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Mitä kompleksiluvut tekevät teoriassa

Kvanttimekaniikassa järjestelmän tilaa kuvataan amplitudeilla, ja lopputuloksen todennäköisyys saadaan amplitudin itseisarvon neliöstä. Tavallisessa teoriassa amplitudit ovat kompleksilukuja: jokaisella on suuruus ja vaihe, eli kulma. Vaihe ei ole koriste. Kun kaksi reittiä samaan lopputulokseen yhdistyy, niiden vaiheet ratkaisevat vahvistavatko vai kumoavatko ne toisiaan — interferenssin, joka on kvanttikäyttäytymisen tunnusmerkki. Koko järjestelmän yhteistä kokonaisvaihetta ei sen sijaan voida koskaan mitata.

Kompleksiluku on pohjimmiltaan reaalilukupari — reaali- ja imaginaariosa — pakattuna yhteen tiettyjen kertolaskusääntöjen kanssa. Siksi luonteva kysymys on, onko pakkaus olennainen. Voisiko kaksi reaalilukua säilyttää, kompleksisen pakkauksen poistaa ja silti saada koko kvanttimekaniikan? Juuri kertolaskusäännöt tekevät kompleksiluvuista enemmän kuin kaksi rinnakkaista lukua, joten vastaus ei ole ilmeinen, ja tässä piilee hienous.

Mitä vuoden 2021 tulos todella osoitti

Renou ja kollegat kysyivät juuri tätä ja muotoilivat kysymyksen terävästi testattavaksi. He eivät kysyneet, voivatko reaaliluvut esiintyä missään kvanttiteoriassa, vaan voiko reaalilukuinen formalismi tuottaa kaikki kompleksisen teorian ennusteet, jos järjestelmien yhdistämiseen käytetään tiettyä sääntöä. Tämä sääntö — kutsutaan sitä tensoritulosäännöksi — on vakiotapa kuvata useita riippumattomia osia yhtenä kokonaisuutena.

Tämän säännön alaisuudessa he löysivät tilanteen, jossa kolme osapuolta jakaa kahdesta riippumattomasta lähteestä tulevaa lomittumista ja reaalilukuinen teoria sekä kompleksinen teoria ennustavat erilaisia, mitattavia korrelaatioita — monen osapuolen Bell-testin. Vuonna 2022 tällaiset testit tehtiin suprajohtavilla piireillä ja fotoneilla. Mitatut korrelaatiot vastasivat kompleksista kvanttimekaniikkaa eivätkä sopineet reaaliseen vaihtoehtoon.

> **Miksi testi tarvitsee kaksi lähdettä eikä yhtä**
>
> Tavallinen Bell-testi käyttää yhtä lähdettä, joka lähettää yhden lomittuneen parin kahdelle henkilölle, Alicelle ja Bobille. Tällaisessa asetelmassa reaalilukuinen kvanttimekaniikka voi tuottaa täsmälleen samat korrelaatiot kuin kompleksinen teoria — niitä ei voi erottaa, joten yksi lähde ei ratkaise niiden välillä.
> Vuoden 2021 argumentti saa otteen lisäämällä toisen, **riippumattoman** lähteen. Kuvittele kolme osapuolta rivissä: Alice, Bob, Charlie. Yksi lähde lomittaa Alicen Bobin kanssa; erillinen lähde, jolla ei ole yhteistä menneisyyttä ensimmäisen kanssa, lomittaa Bobin Charlien kanssa. Bob on keskellä ja mittaa kaksi hiukkastaan yhdessä, yhdistäen puoliskot. Kahden lähteen *riippumattomuus* — oletus, että ne valmistettiin erikseen — tekee työn: riippumattomien järjestelmien tavallisella tensoritulosäännöllä reaaliteoria ei pysty vastaamaan kompleksisen kvanttimekaniikan tälle verkolle ennustamia kolmen osapuolen korrelaatioita, vaikka yhden lähteen testi jättäisi teoriat tasoihin. Juuri tätä eroa kokeet mittasivat.

Tämä on todellinen ja selkeä tulos. Mutta huomaa tarkasti, mitä siinä verrattiin: tavallista kompleksista kvanttiteoriaa yhteen tiettyyn reaaliteoriaan — sellaiseen, joka säilyttää tavallisen tensoritulosäännön. Kokeet ratkaisivat tämän parin välisen eron, eivät reaalilukujen kohtaloa sinänsä. Uusi artikkeli käyttää kvanttifysiikan perusteista lainattua termiä ja kutsuu hylättyä vaihtoehtoa siksi, mitä se on: *foil theory*, tarkoituksellinen vertailuteoria, jota kukaan ei esitä totena vaan joka rakennetaan hyväksytyn teorian kontrastiksi niin, että koe voi erottaa ne. Sen arvo on juuri erotettavuudessa: vertailuteorian hylkääminen paljastaa, mitkä reaaliteorian oletukset tekivät eron.

Mitä uusi artikkeli muuttaa

Uusi työ säilyttää lähes kaiken ja muuttaa yhden postulaatin. Järjestelmien yhdistämisen tensoritulosäännön sijasta se lähtee lokaalisuusvaatimuksesta, jota kirjoittajat pitävät fysikaalisesti perustavampana: vain yhteen osajärjestelmään tehtävä operaatio ei saa aiheuttaa mitattavaa vaikutusta

toiseen, koskemattomaan osajärjestelmään.

Tästä lähtökohdasta he rakentavat reaalilukuisen kvanttimekaniikan eksplisiittisesti. Tavallisten amplitudien reaali- ja imaginaariosia kuljetetaan mukana ylimääräisenä reaalisena tietona — artikkeli kutsuu sitä kuhunkin järjestelmään kiinnitetyksi ”lipuksi” — ja kompleksisen teorian havaitsematon kokonaisvaihe muuttuu reaaliteoriassa yhtä lailla havaitsemattomaksi rotaatioksi. Hinta näkyy juuri siellä, mihin vuoden 2021 tulos sen paikansi: järjestelmien yhdistämisessä. Naiivi tapa liimata nämä reaaliset kuvaukset yhteen ei edes anna hyvin määriteltyä sääntöä, joten konstruktio ryhmittelee samaa fysiikkaa kuvaavat esitykset luokiksi ja työskentelee niiden kanssa. Tällä yhdistämissäännöllä reaaliteoria tuottaa jokaisen kompleksisen teorian ennustaman odotusarvon — yhdelle järjestelmälle ja monelle, erillisten osapuolten yli lomittuneena. Kirjoittajat osoittavat konstruktion olevan myös olennaisesti yksikäsitteinen ja standardin kvanttimekaniikan kanssa ekvivalentti.

Siksi monen osapuolen kokeet eivät voi erottaa tätä reaaliteoriaa kompleksisesta, koska ne ovat samaa mieltä kaikista ennusteista. Aiemmat kokeet eivät epäonnistuneet; ne testasivat vain toista, rajoittavampaa reaaliteoriaa.

Miksi tämä ei ole ristiriita

Tämän voisi helposti lukea muodossa ”vuoden 2021 kokeet olivat väärässä”. Päinvastoin. Kokeet olivat oikein, ja uusi artikkeli tarvitsee niiden olevan oikein: se hyväksyy jokaisen mitatun korrelaation ja näyttää reaalisen formalismin, joka tuottaa ne myös. Se muuttaa tulkintaa — hyppyä väitteestä ”tämä reaaliteoria on falsifioitu” väitteeseen ”reaaliluvut ovat kvanttimekaniikassa mahdottomia”. Hyppy ohitti oletuksen, joka teki työn.

Artikkeli ei myöskään ehdota kompleksiluvuista luopumista. Sen oma yhteenveto on tarkka molempiin suuntiin: kompleksiluvut eivät ole ehdottoman välttämättömiä, ja ne ovat erittäin hyödyllisiä. Reaalinen konstruktio tarvitsee ylimääräisen lipun jokaiselle järjestelmälle ja hienovaraisemman säännön niiden yhdistämiseen; kompleksiluvut pakkaavat kaiken tämän yhteen siistiin laskutoimitukseen. Kätevyys ei ole vähäpätöistä. Fysiikassa se on usein koko syy siihen, miksi jokin formalismi voittaa.

Miksi tällä on merkitystä

Taustalla oleva kiinnostava kysymys on, mitä ”välttämätön” tarkoittaa fysikaaliselle teorialle. Koe voi erottaa kaksi teoriaa, kun ne ennustavat eri asioita. Koe ei yksin voi kertoa, että tietty matemaattinen aines on ainoa mahdollinen säiliö joukolle ennusteita — se on kysymys siitä, mitä teorioita on olemassa, ja se ratkaistaan konstruktiolla, ei mittauksella. Tämä artikkeli on juuri konstruktio: se näyttää vaihtoehdon, jonka kokeiden ajateltiin sulkeneen pois.

Tulos terävöittää myös yleisesti hyödyllistä eroa. ”Tämä teoria on falsifioitu” ja ”tämä matemaattinen työkalu on väistämätön” ovat eri väitteitä, ja niiden välissä puhdas kokeellinen tulos voi muuttua

ylilyönniksi. Kompleksiluvut ovat edelleen kvanttimekaniikan luonteva ja tehokas kieli. Se, ovatko ne metafyysisesti välttämättömiä, on eri kysymys, ja siihen vastaus on tällä hetkellä ei.

Tiivistelmä

Vuoden 2021 ehdotus ja vuoden 2022 kokeet osoittivat, että tavalliseen järjestelmien yhdistämisen tensoritulosääntöön rakennettu reaalilukuinen kvanttimekaniikka tekee kompleksisesta kvanttimekaniikasta poikkeavia, testattavia ennusteita, ja kokeet suosivat kompleksista teoriaa. Tätä uutisoitiin laajasti todisteena imaginaarilukujen fyysisestä välttämättömyydestä. Uusi *Physical Review Letters* -artikkeli rakentaa reaalilukuisen kvanttimekaniikan erilaiselle, lokaalisuuteen perustuvalle postulaatille ja tuottaa sillä kaikki kompleksisen teorian ennusteet, myös monen osapuolen testit — mikä osoittaa kompleksilukujen olevan käteviä pikemmin kuin ehdottoman välttämättömiä. Kyse on teoreettisesta konstruktiosta, se ei kumoa aiempia kokeita eikä vaadi kvanttimekaniikan käytännön uudelleenmuotoilua.

Realistinen arvio

Mitä artikkeli osoittaa: Vain reaalilukuja käyttävä, sisäisesti johdonmukainen kvanttimekaniikan formalismi voi tuottaa kaikki tavallisen kompleksisen teorian ennusteet, myös monen osapuolen Bell-tyyppisissä kokeissa, jos se rakennetaan lokaalisuuspostulaatille eikä järjestelmien yhdistämisen tensoritulosäännölle.

Mikä on uskottavaa mutta ei varsinainen tulos: Että tämä ”kumoaisi” vuosien 2021–2022 tulokset. Ei kumoa. Artikkeli hyväksyy kokeet oikeiksi ja tulkitsee niiden rajauksen uudelleen: ne sulkivat pois yhden tietyn reaaliteorian, joka säilyttää tensoritulosäännön, eivät reaalilukuja periaatteessa.

Mitä se ei osoita: Että kompleksiluvut olisivat vääriä, hyödyttömiä tai käytännössä hylättävissä — artikkeli kutsuu niitä nimenomaan erittäin hyödyllisiksi. Kyse ei myöskään ole uudesta kokeesta: uutta dataa ei mitattu; väite on matemaattinen konstruktio ja johdonmukaisuustodistus.

Keskeiset rajoitukset tavalliselle lukijalle: Argumentti riippuu siitä, kumpaa oletusta pidetään fysikaalisesti perustavampana — tensoritulosääntöä vai lokaalisuuspostulaattia. Se on perusteltu valinta jatkuvassa perustekeskustelussa, ei mittauksen yksin määräämä fakta, ja reaalilukukonstruktio on väitetysti vähemmän luonteva kuin kompleksinen formalismi, jonka ennusteita se vastaa.

Kuinka luottavaisesti tavallisen lukijan kannattaa suhtautua? Korkealla luottamuksella konstruktion matemaattiseen johdonmukaisuuteen — se on vertaisarvioitu ja logiikka on tarkistettavissa. Luotettava johtopäätös on vaatimaton: kompleksiluvut ovat kvanttimekaniikan kätevä kieli, eivät osoitettu metafyysinen välttämättömyys. Otsikkoa ”imaginaariluvut ovat todellisia” kannattaa käsitellä iskulauseena, jota tämä artikkeli nimenomaan korjaa.

Lähteet

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