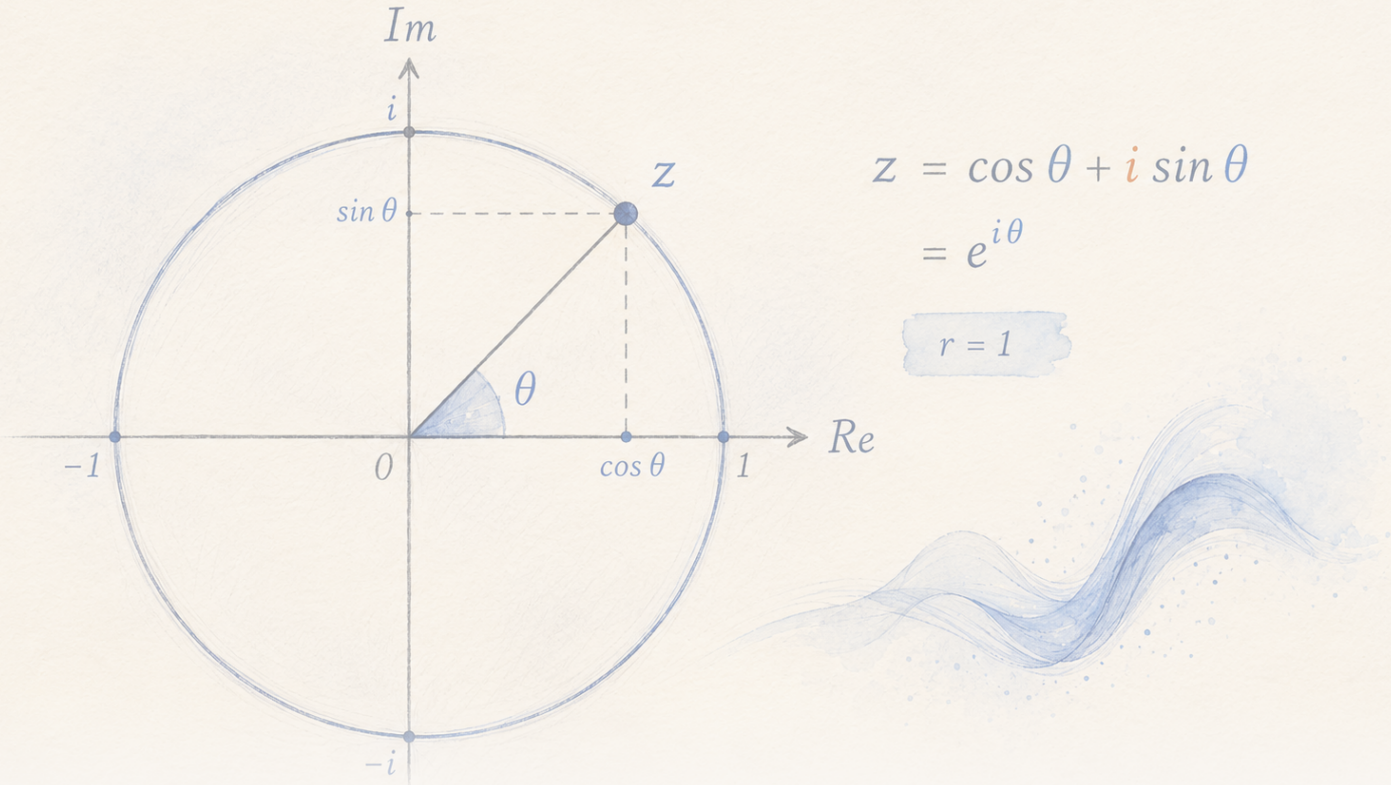


The Clean Paper

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

Kwantummeganika kan met slegs reële getalle geskryf word — die vangplek is hoe jy stelsels kombineer

In 2021 het 'n veelbesproke resultaat gestel dat 'n weergawe van kwantummeganika met slegs reële getalle eksperimenteel gefalsifiseer kon word; opvolgeksperimente in 2022 het met die standaard komplekse kwantumteorie ooreengestem. Dit is dikwels aangebied as bewys dat imaginêre getalle fisies werklik is. 'n Nuwe artikel in Physical Review Letters verskerp die bewering: bou die reële formulering op 'n ander, moontlik fisies fundamenteler aanname oor hoe afsonderlike stelsels gekombineer word, en dit reproduseer al die voorspellings van komplekse kwantummeganika, insluitend die veelpartytoetse. Die eerlike lesing is dat komplekse getalle gerieflik maar nie streng noodsaaklik is nie — en dat die vroeëre eksperimente een spesifieke reële teorie uitgesluit het, nie reële getalle in beginsel nie. Dit is 'n teoretiese grondslageresultaat, nie 'n nuwe meting nie, en niemand word gevra om op te hou om komplekse getalle te gebruik nie.

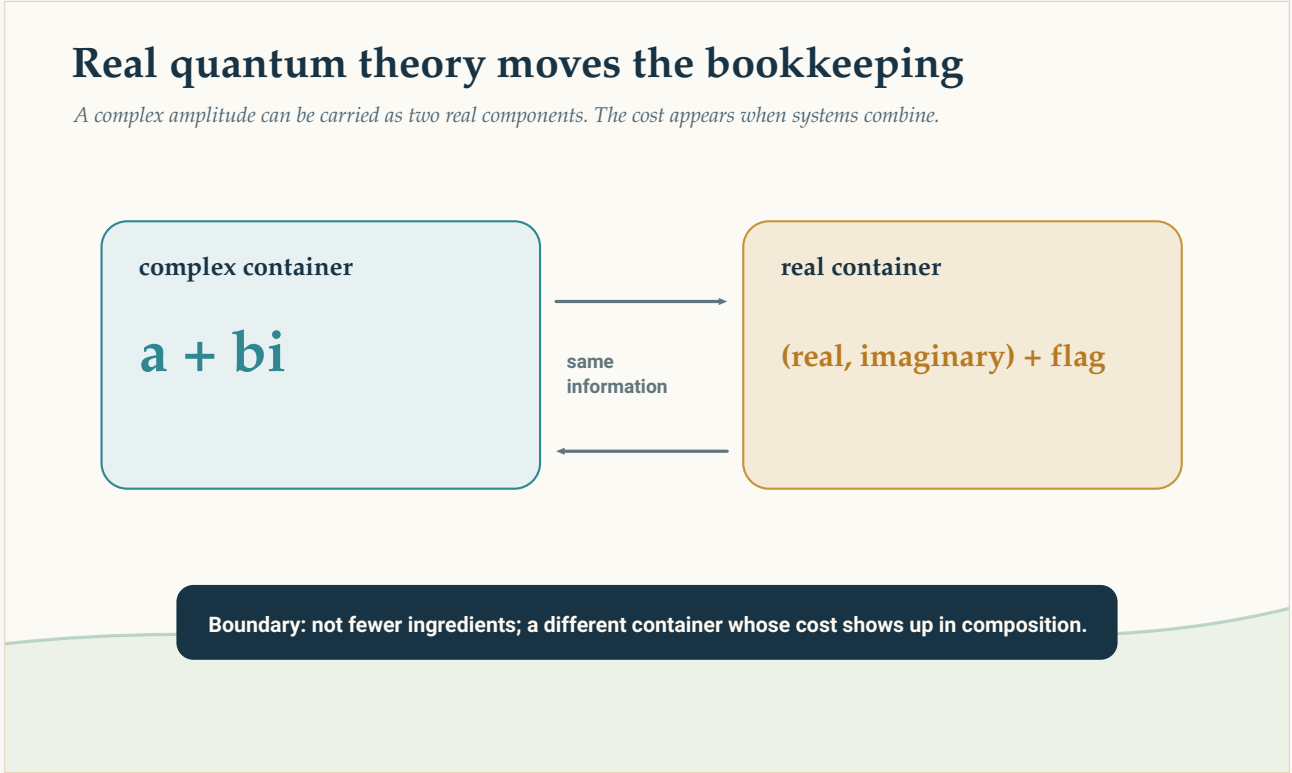
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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

’n Opskrif wat die moeite werd is om weer te lees

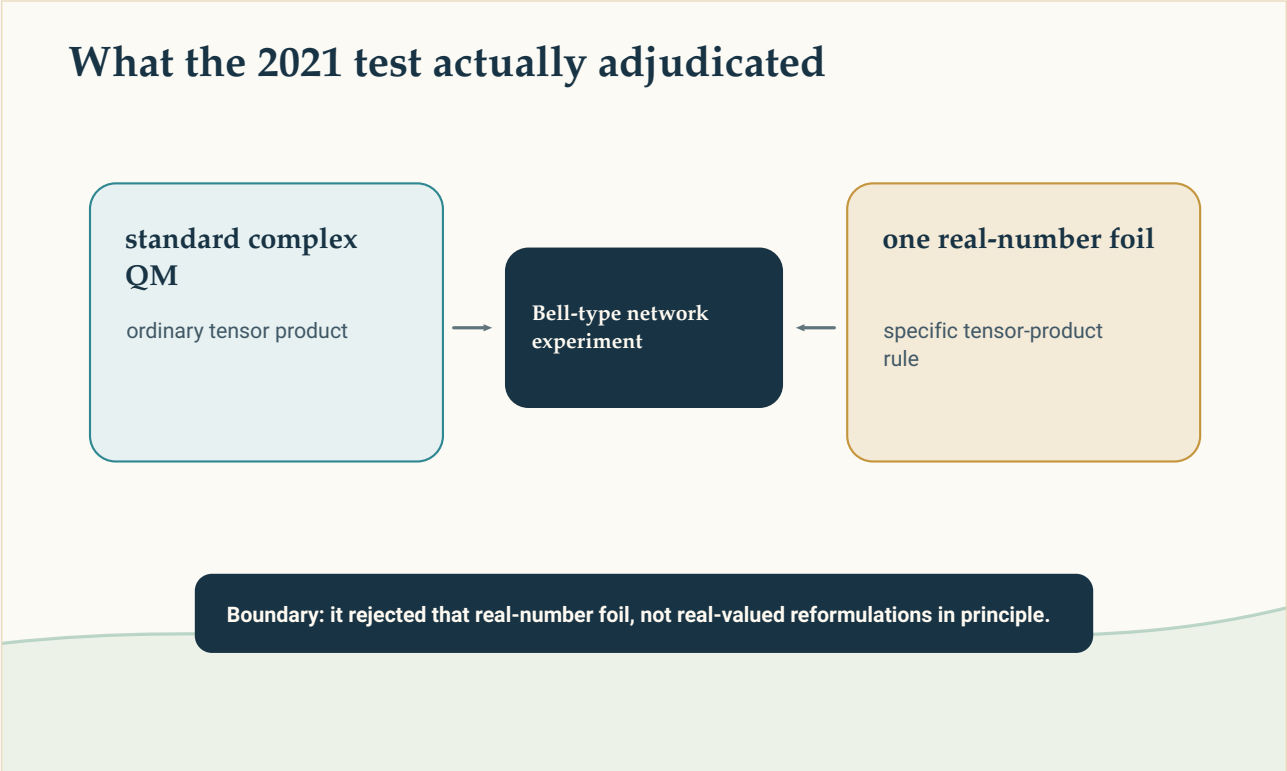
’n Paar jaar gelede het ’n treffende bewering die rondte gedoen: eksperimente sou gewys het dat imaginêre getalle fisies werklik is, en dat kwantummeganika nie daarsonder geformuleer kan word nie. Dié bewering het uit werklike, noukeurige fisika gekom — ’n voorstel uit 2021 in *Nature* deur Marc-Olivier Renou en kollegas, en eksperimente in 2022 wat dit uitgevoer het. Maar die gewilde weergawe het ’n presiese stelling in ’n slagspreuk saamgepers, en daardie slagspreuk was sterker as die resultaat.

’n Nuwe artikel in *Physical Review Letters* deur Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping en Dagmar Bruß stel daardie presiese bewering weer reg. Dit konstrueer ’n weergawe van kwantummeganika wat slegs reële getalle gebruik en tog al die voorspellings van die standaard komplekse teorie reproduseer — insluitend presies die veelparty-eksperimente wat reële getalle sou uitgesluit het. Die truuk is nie om imaginêre getalle heimlik terug te smokkel nie. Een aanname oor hoe afsonderlike stelsels gekombineer word, verander. Die eerlike gevolgtrekking, in die outeurs se eie woorde, is dat komplekse getalle nie noodsaaklik is om kwantummeganika te beskryf nie, maar wel buitengewoon nuttig is.



’n Komplekse amplitude a+bi is ’n paar reële getalle met daarby ’n soort “vlag” wat saam met elke stelsel gedra word. Die reële formulering bevat nie minder bestanddele nie — net ’n ander verpakking, waarvan die prys sigbaar word in die manier waarop stelsels gekombineer word.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



Die eksperimente van 2021–22 het twee spesifieke teorieë vergelyk — standaard komplekse kwantummeganika met 'n reële "foil theory" wat die tensorprodukreël behou — en het die komplekse teorie ondersteun. Hulle het daardie foil-teorie uitgesluit, nie reële getalle as beginsel nie.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Wat komplekse getalle in die teorie doen

In kwantummeganika word die toestand van 'n stelsel deur amplitudes beskryf, en om die waarskynlikheid van 'n uitkoms te kry, neem mens die kwadraat van die grootte van so 'n amplitude. In die standaardteorie is dié amplitudes komplekse getalle: elkeen het 'n grootte en 'n fase, 'n hoek. Daardie fase is nie versiering nie. Wanneer twee paaie na dieselfde uitkoms saamkom, bepaal hul fase of hulle mekaar versterk of uitkanselleer — die interferensie wat kenmerkend van kwantumgedrag is. 'n Globale fase wat deur die hele stelsel gedeel word, kan daarenteen nooit gemeet word nie.

'n Komplekse getal is in wese net 'n paar reële getalle — 'n reële en 'n imaginêre deel — saamgepak met spesifieke reëls vir hoe hulle vermenigvuldig. Die natuurlike vraag is dus of daardie verpakking noodsaaklik is. Kan jy die twee reële getalle behou, die komplekse verpakking weglaat en steeds die volle kwantummeganika oorhou? Juis die vermenigvuldigingsreëls maak komplekse getalle meer as twee getalle langs mekaar, dus is die antwoord nie vanselfsprekend nie. Dít is waar die subtiliteit lê.

Wat die 2021-resultaat werklik gewys het

Renou en kollegas het presies dié vraag gevra en dit skerp en toetsbaar gemaak. Hulle het nie gevra of reële getalle êrens in kwantumteorie kan voorkom nie; hulle het gevra of ’n formulering met reële getalle al die voorspellings van die komplekse teorie kan ewenaar wanneer een bepaalde reël gebruik word om stelsels te kombineer. Daardie reël — noem dit die tensorprodukreël — is die standaard-voorskrif om verskillende onafhanklike dele as een geheel te beskryf.

Onder dié reël het hulle ’n scenario gevind met drie partye wat verstrengeling uit twee onafhanklike bronne deel, waarin ’n reële teorie en die komplekse teorie verskillende, meetbare korrelasies voorspel — ’n veelparty-variant van ’n Bell-toets. In 2022 het eksperimente met supergeleidende stroombane en met fotone sulke toetse uitgevoer. Die gemete korrelasies het met komplekse kwantummeganika ooreengestem en was nie met die reële alternatief versoenbaar nie.

> **Waarom die toets twee bronne nodig het, nie een nie**
>
> ’n Gewone Bell-toets gebruik een bron wat een verstrengelde paar na twee persone, Alice en Bob, stuur. Vir daardie opstelling kan ’n kwantummeganika wat slegs reële getalle gebruik presies dieselfde korrelasies as die komplekse teorie reproduseer — die twee is dan nie onderskeibaar nie, dus kan een bron geen keuse tussen hulle afdwing nie.
> Die 2021-argument kry eers houvas wanneer ’n tweede, **onafhanklike** bron bygevoeg word. Stel drie partye in ’n ry voor: Alice, Bob, Charlie. Een bron verstrengel Alice met Bob; ’n afsonderlike bron, sonder ’n gedeelde verlede, verstrengel Bob met Charlie. Bob sit in die middel en meet sy twee deeltjies gesamentlik, sodat die twee helftes verbind word. Dit is die *onafhanklikheid* van die twee bronne — die aanname dat hulle apart voorberei is — wat die werk doen: onder die standaard tensorprodukreël om onafhanklike stelsels te kombineer, kan ’n reële teorie nie die driewegkorrelasies ewenaar wat komplekse kwantummeganika vir hierdie netwerk voorspel nie, terwyl ’n eenbrontoets die twee teorieë gelykop laat eindig. Dít is die verskil wat die eksperimente gemeet het.

Dit is ’n werklike en helder resultaat. Maar kyk mooi na wat vergelyk is: standaard komplekse kwantumteorie teenoor een spesifieke reële teorie — dié wat die gewone tensorprodukreël behou. Dit is daardie kombinasie, nie die gebruik van reële getalle op sigself nie, waaroor die eksperimente uitspraak gelewer het. Die nuwe artikel gebruik ’n term uit die grondslagenavorsing van kwantumteorie en noem die uitgeslote alternatief wat dit is: ’n *foil theory* — ’n teorie wat niemand as waar voorhou nie, maar doelbewus as kontras met die aanvaarde teorie gebou word sodat ’n eksperiment tussen hulle kan onderskei. Die waarde daarvan is juis dat dit onderskeibaar is: deur die foil-teorie uit te sluit, sien mens watter aannames van die reële teorie die verskil veroorsaak het.

Wat die nuwe artikel verander

Die nuwe werk behou byna alles en verander een postulaat. In plaas daarvan om die tensorprodukreël as vertrekpunt te neem vir die kombinasie van stelsels, begin dit by ’n lokaliteitsvereiste wat volgens die outeurs fisies fundamenteler is: ’n operasie wat slegs op een substelsel uitgevoer word, mag geen meetbare effek op ’n ander, onaangeraakte substelsel hê nie.

Vanuit dié vertrekpunt bou hulle eksplisiet ’n kwantummeganika met slegs reële getalle. Die reële en imaginêre dele van die gewone amplitudes word as ekstra reële inligting saamgedra — die artikel noem dit ’n “vlag” wat aan elke stelsel geheg is — en die onmeetbare globale fase van die komplekse teorie word in die reële teorie ’n ewe onmeetbare rotasie. Die prys verskyn presies waar die 2021-resultaat dit gelokaliseer het: in die manier waarop stelsels gekombineer word. Die naïewe manier om hierdie reële beskrywings aan mekaar te koppel lewer nie eens ’n unieke voorskrif nie. Die konstruksie groepeer daarom beskrywings wat dieselfde fisika voorstel en werk met daardie ekwivalensieklasse. Met dié kombinasiereël reproduseer die reële teorie elke verwagtingswaarde wat die komplekse teorie voorspel — vir een stelsel én vir baie stelsels wat oor afsonderlike partye verstrengel is. Die outeurs wys boonop dat die konstruksie in wese uniek en ekwivalent aan standaardkwantummeganika is.

Die veelparty-eksperimente kan hierdie reële teorie dus nie van die komplekse onderskei nie, omdat albei op elke voorspelling ooreenstem. Die vroeëre eksperimente het nie misluk nie; hulle het bloot teen ’n ander, beperkter reële teorie getoets.

Waarom dit nie ’n teenstrydigheid is nie

Dit sou aanloklik wees om dit as “die 2021-eksperimente was verkeerd” te lees. Die teenoorgestelde is waar. Die eksperimente was korrek, en hierdie artikel hang juis daarvan af dat hulle korrek was: dit aanvaar al die gemete korrelasies en wys dat ’n reële formulering hulle ook kan produseer. Wat hersien word, is die interpretasie — die sprong van “hierdie reële teorie is gefalsifiseer” na “reële getalle is onmoontlik in kwantummeganika”. In daardie sprong is die aanname wat die werklike werk gedoen het, oorgeslaan.

Die artikel voer ook nie aan dat enigiemand komplekse getalle behoort te laat vaar nie. Die outeurs se opsomming is aan albei kante versigtig: komplekse getalle is nie streng noodsaaklik nie, en hulle is baie nuttig. Die reële konstruksie benodig vir elke stelsel ’n ekstra vlag en ’n subtieler reël om stelsels te kombineer; komplekse getalle pak dit alles saam in een netjiese wiskundige struktuur. Gerief is nie onbelangrik nie. In fisika is dit dikwels presies waarom ’n formalisme wen.

Waarom dit saak maak

Die interessante onderliggende vraag is wat die woord “noodsaaklik” in ’n fisiese teorie beteken. ’n Eksperiment kan tussen twee teorieë onderskei wanneer hulle verskillende dinge voorspel. Op sigself kan dit nie wys dat een bepaalde wiskundige bestanddeel die enigste moontlike verpakking vir ’n stel voorspellings is nie — dit is ’n vraag oor watter teorieë hoegenaamd kan bestaan, en dié word deur konstruksie beslis, nie deur meting nie. Hierdie artikel lewer so ’n konstruksie: dit wys eksplisiet die alternatief waarvan gemeen is dat die eksperimente dit uitgesluit het.

Die resultaat verskerp ook ’n onderskeid wat breër nuttig is. “Hierdie teorie is gefalsifiseer” en “hierdie wiskundige hulpmiddel is onvermydelik” is verskillende stellings, en juis in die ruimte tussen hulle kan ’n duidelike eksperimentele resultaat in ’n oordrewe bewering verander. Komplekse getalle bly die natuurlike en doeltreffende taal van kwantummeganika. Of hulle metafisies noodsaaklik is, is ’n ander vraag — en vir nou is die antwoord nee.

Kortliks

’n Voorstel uit 2021 en eksperimente uit 2022 het gewys dat ’n kwantummeganika wat slegs reële getalle gebruik, gebou op die standaard tensorprodukreël vir die kombinasie van stelsels, ander en toetsbare voorspellings maak as komplekse kwantummeganika; die eksperimente het die komplekse teorie ondersteun. Dit is wyd aangebied as bewys dat imaginêre getalle fisies noodsaaklik is. Die nuwe artikel in *Physical Review Letters* konstrueer ’n kwantummeganika met reële getalle op grond van ’n ander, lokaliteitsgebaseerde postulaat wat al die voorspellings van die komplekse teorie reproduseer — insluitend die veelpartytoetse. Komplekse getalle blyk dus gerieflik maar nie streng noodsaaklik te wees nie. Dit is ’n teoretiese konstruksie, dit keer nie die vroeëre eksperimente om nie, en dit voer nie aan dat kwantummeganika in die praktyk anders geformuleer moet word nie.

Nugtere beoordeling

Wat die artikel wys: Dat ’n intern konsekwente formulering van kwantummeganika wat slegs reële getalle gebruik al die voorspellings van die standaard komplekse teorie kan reproduseer, insluitend veelparty-eksperimente van die Bell-tipe, wanneer dit op ’n lokaliteitspostulaat eerder as die tensorprodukreël vir die kombinasie van stelsels gebou word.

Wat geloofwaardig is maar nie die punt nie: Dat dit die resultate van 2021–2022 “weerlê”. Dit doen dit nie. Dit aanvaar daardie eksperimente as korrek en herinterpreteer hul reikwydte: hulle het een spesifieke reële teorie uitgesluit, naamlik dié wat die tensorprodukreël behou, nie reële getalle in beginsel nie.

Wat dit nie wys nie: Dat komplekse getalle verkeerd, nutteloos of in die praktyk oorbodig is — die artikel noem hulle uitdruklik baie nuttig. Dit is ook nie ’n nuwe eksperiment nie: geen nuwe data is

gemeet nie; die bewering bestaan uit ’n wiskundige konstruksie en ’n konsekwentheidsbewys.

Belangrikste beperkings vir ’n algemene leser: Die argument draai om watter aanname mens fisies fundamenteler vind — die tensorprodukreël of die lokaliteitspostulaat. Dit is ’n beredeneerde keuse binne ’n voortgaande debat oor die grondslagenavorsing, nie ’n feit wat deur meting vasgelê is nie, en die reële konstruksie is aantoonbaar minder natuurlik as die komplekse formulering wat dit naboots.

Hoeveel vertroue behoort ’n algemene leser te hê? Hoog dat die konstruksie wiskundig konsekwent is — die artikel is ewekniebeoordeel en die logika kan nagegaan word. Die betroubare gevolgtrekking is die beskeie weergawe: komplekse getalle is die gerieflike taal van kwantummeganika, nie ’n bewese metafisiese noodsaaklikheid nie. Behandel enige opskrif soos “imaginêre getalle is werklik” as presies die slagspreuk wat hierdie artikel probeer regstel.

Bronne

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