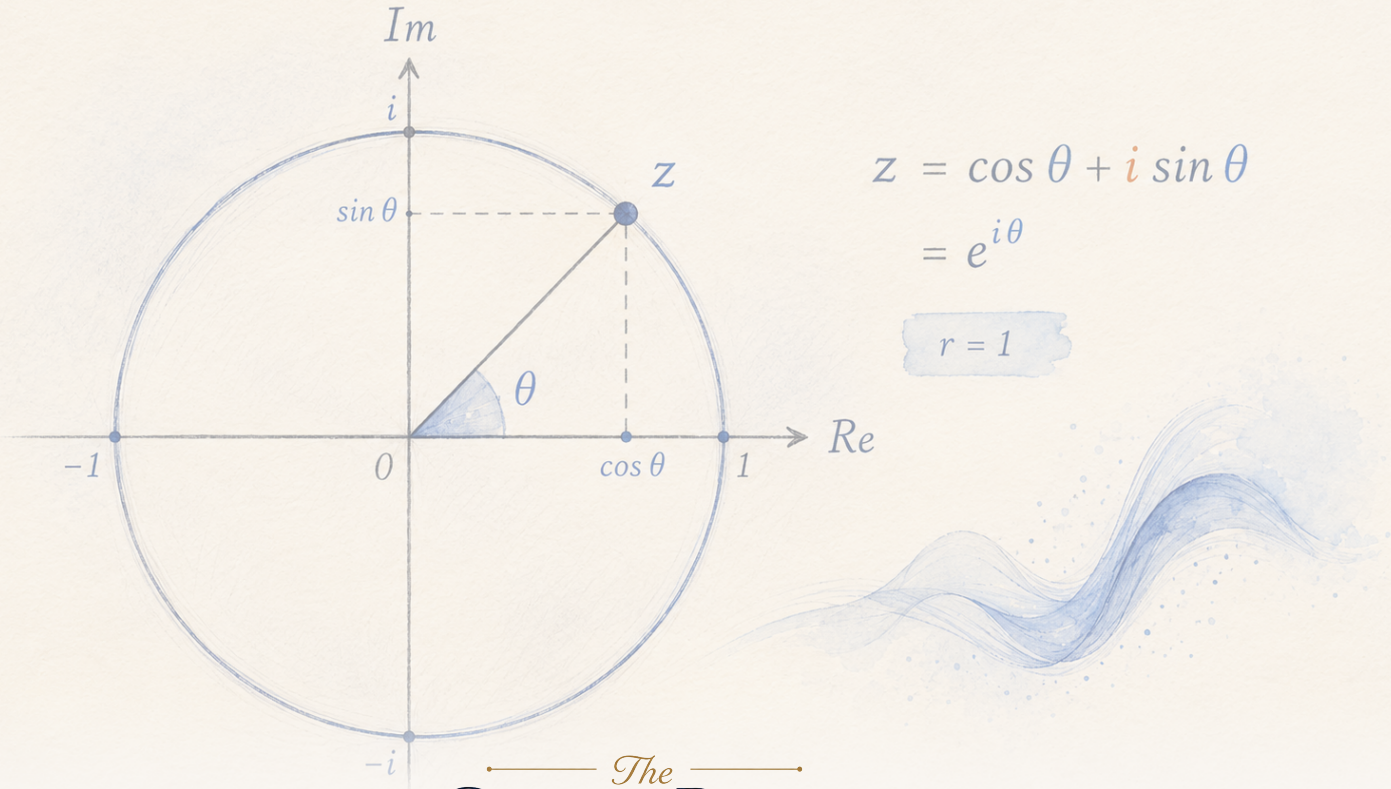


The Clean Paper

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

Kwantummechanica kan met alleen reële getallen worden geschreven — de adder zit in hoe je systemen combineert

In 2021 stelde een veelbesproken resultaat dat een versie van de kwantummechanica met alleen reële getallen experimenteel kon worden gefalsifieerd; vervolgexperimenten in 2022 kwamen overeen met de standaard complexe kwantumtheorie. Dat werd vaak gebracht als bewijs dat imaginaire getallen fysiek echt zijn. Een nieuw artikel in Physical Review Letters scherpt de claim aan: bouw de reële formulering op een andere, mogelijk fysisch fundamentelere aanname over hoe afzonderlijke systemen worden gecombineerd, en zij reproduceert alle voorspellingen van complexe kwantummechanica, inclusief de meerpartijentests. De eerlijke lezing is dat complexe getallen handig zijn maar niet strikt noodzakelijk — en dat de eerdere experimenten één specifieke reële theorie uitsloten, niet reële getallen in principe. Het is een resultaat over de grondslagen op papier, geen nieuwe meting, en niemand wordt gevraagd te stoppen met complexe getallen.

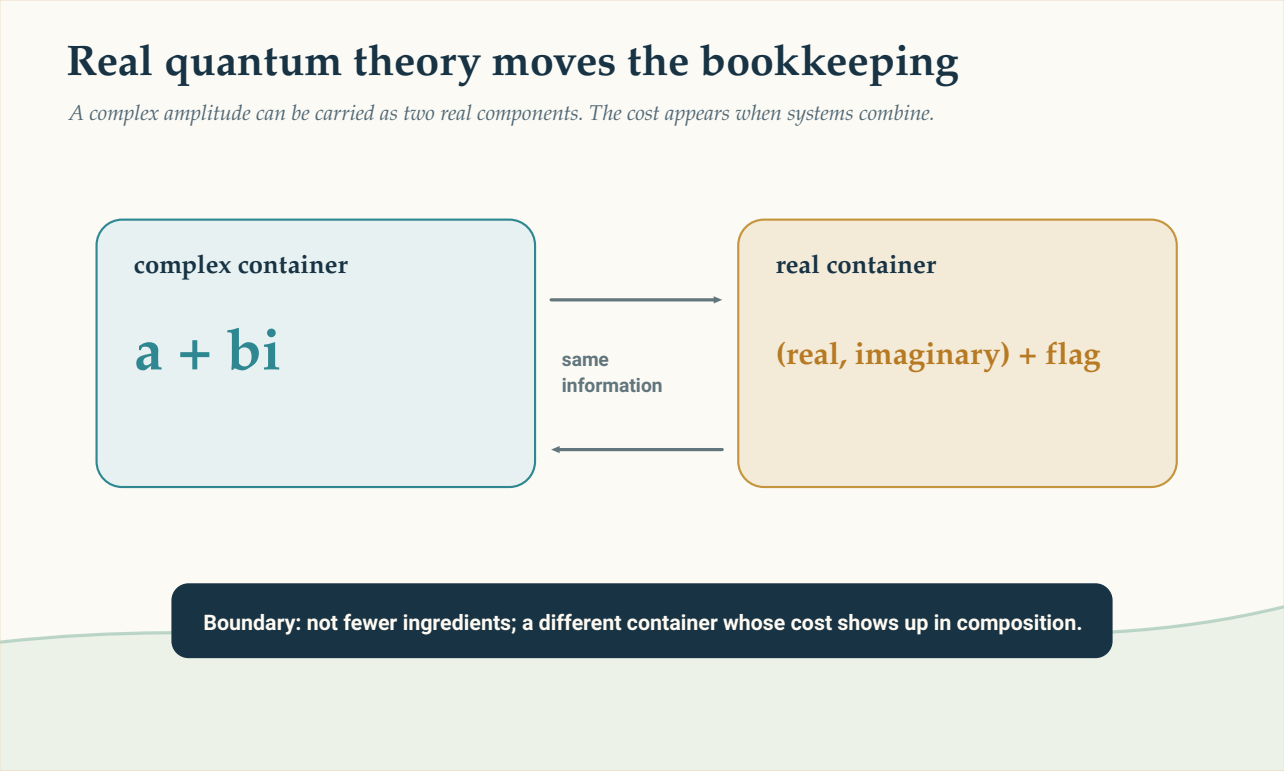
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

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

Een kop die het waard is opnieuw te lezen

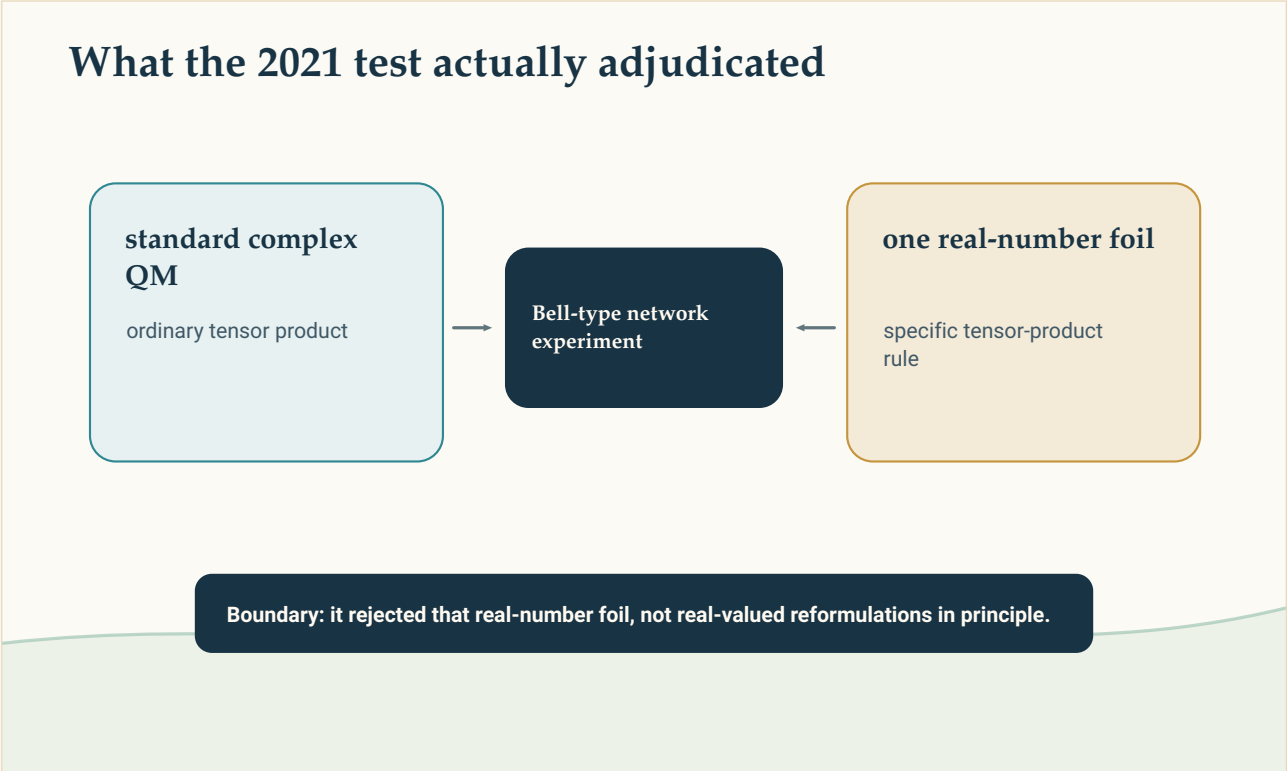
Een paar jaar geleden deed een opvallende bewering de ronde: experimenten zouden hebben aangetoond dat imaginaire getallen fysiek echt zijn, en dat de kwantummechanica niet zonder kan worden geformuleerd. Die bewering kwam voort uit echte, zorgvuldige fysica — een voorstel uit 2021 in *Nature* van Marc-Olivier Renou en collega's, en experimenten uit 2022 die het uitvoerden. Maar de populaire versie perste een precieze uitspraak samen tot een slogan, en die slogan was sterker dan het resultaat.

Een nieuw artikel in *Physical Review Letters* van Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping en Dagmar Bruß zet die precieze uitspraak weer recht. Het construeert een versie van de kwantummechanica die alleen reële getallen gebruikt en toch alle voorspellingen van de standaard complexe theorie reproduceert — inclusief precies de meerpartijenexperimenten die reële getallen zouden hebben uitgesloten. De truc is niet om imaginaire getallen stiekem weer binnen te smokkelen. Er verandert één aanname over hoe afzonderlijke systemen worden gecombineerd. De eerlijke conclusie, in de woorden van de auteurs zelf, is dat complexe getallen niet noodzakelijk zijn om kwantummechanica te beschrijven, maar wel buitengewoon nuttig.



Een complexe amplitude a+bi is een paar reële getallen met daarnaast een soort „vlag" die met elk systeem wordt meegedragen. De reële formulering bevat niet minder ingrediënten — alleen een andere verpakking, waarbij de prijs zichtbaar wordt in de manier waarop systemen worden gecombineerd.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0



De experimenten uit 2021–22 vergeleken twee specifieke theorieën — standaard complexe kwantummechanica met een reële „foiltheorie" die de tensorproductregel behoudt — en vielen uit in het voordeel van de complexe theorie. Ze sloten die foiltheorie uit, niet reële getallen als principe.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Wat complexe getallen in de theorie doen

In de kwantummechanica wordt de toestand van een systeem beschreven door amplitudes, en om de kans op een uitkomst te krijgen neem je het kwadraat van de grootte van zo'n amplitude. In de standaardtheorie zijn die amplitudes complexe getallen: elk heeft een grootte en een fase, een hoek. Die fase is geen versiering. Wanneer twee paden naar dezelfde uitkomst samenkomen, bepaalt hun fase of ze elkaar versterken of uitdoven — de interferentie die kenmerkend is voor kwantumgedrag. Een globale fase die door het hele systeem wordt gedeeld, kan daarentegen nooit worden gemeten.

Een complex getal is in wezen gewoon een paar reële getallen — een reëel en een imaginair deel — samengepakt met specifieke regels voor hoe ze met elkaar vermenigvuldigen. De natuurlijke vraag is dus of die verpakking essentieel is. Kun je de twee reële getallen behouden, de complexe verpakking weglaten en toch de volledige kwantummechanica overhouden? Juist de vermenigvuldigingsregels maken complexe getallen tot meer dan twee getallen naast elkaar, dus het antwoord ligt niet voor de hand. Daar zit de subtiliteit.

Wat het resultaat uit 2021 werkelijk aantoonde

Renou en collega's stelden precies die vraag, en maakten haar scherp en toetsbaar. Ze vroegen niet of reële getallen ergens in de kwantumtheorie kunnen voorkomen; ze vroegen of een formulering met reële getallen alle voorspellingen van de complexe theorie kan evenaren wanneer je één bepaalde regel gebruikt om systemen te combineren. Die regel — noem hem de tensorproductregel — is het standaardvoorschrift om verschillende onafhankelijke delen als één geheel te beschrijven.

Onder die regel vonden ze een scenario met drie partijen die verstrengeling delen uit twee onafhankelijke bronnen, waarin een reële theorie en de complexe theorie verschillende, meetbare correlaties voorspellen — een meerpartijenvariant van een Bell-test. In 2022 voerden experimenten met supergeleidende circuits en met fotonen zulke tests uit. De gemeten correlaties kwamen overeen met complexe kwantummechanica en waren niet verenigbaar met het reële alternatief.

> **Waarom de test twee bronnen nodig heeft, niet één**
>
> Een gewone Bell-test gebruikt één bron die één verstrengeld paar naar twee personen stuurt, Alice en Bob. Voor die opzet kan een kwantummechanica met alleen reële getallen exact dezelfde correlaties reproduceren als de complexe theorie — de twee zijn dan niet van elkaar te onderscheiden, zodat één bron geen keuze tussen beide kan afdwingen.
> Het argument uit 2021 krijgt pas grip wanneer er een tweede, **onafhankelijke** bron bijkomt. Stel je drie partijen op een rij voor: Alice, Bob, Charlie. Eén bron verstrengelt Alice met Bob; een afzonderlijke bron, zonder gedeeld verleden, verstrengelt Bob met Charlie. Bob zit in het midden en meet zijn twee deeltjes gezamenlijk, zodat de twee helften worden gekoppeld. Het is de *onafhankelijkheid* van de twee bronnen — de aanname dat ze los van elkaar zijn voorbereid — die het werk doet: onder de standaard tensorproductregel voor het combineren van onafhankelijke systemen kan een reële theorie de driewegcorrelaties die complexe kwantummechanica voor dit netwerk voorspelt niet evenaren, terwijl een test met één bron beide theorieën gelijk laat eindigen. Dat verschil is wat de experimenten maten.

Dat is een echt en helder resultaat. Maar kijk goed naar wat er werd vergeleken: standaard complexe kwantumtheorie tegenover één specifieke reële theorie — degene die de gewone tensorproductregel behoudt. Het is die combinatie, niet het gebruik van reële getallen op zichzelf, waarover de experimenten uitsluitsel gaven. Het nieuwe artikel gebruikt hiervoor een term uit de grondslagen van de kwantumtheorie en noemt het uitgesloten alternatief wat het is: een *foiltheorie* — een theorie die niemand als waar voorstelt, maar bewust als contrast met de geaccepteerde theorie wordt opgebouwd zodat een experiment onderscheid kan maken. De hele waarde ervan is juist dat ze onderscheidbaar is: door de foiltheorie uit te sluiten zie je welke aannames van de reële theorie het verschil veroorzaakten.

Wat het nieuwe artikel verandert

Het nieuwe werk behoudt bijna alles en wijzigt één postulaat. In plaats van de tensorproductregel als uitgangspunt te nemen voor het combineren van systemen, vertrekt het van een lokaliteitseis die volgens de auteurs fysisch fundamenteler is: een operatie die alleen op één subsysteem wordt uitgevoerd, mag geen meetbaar effect hebben op een ander, onaangeroerd subsysteem.

Vanuit dat uitgangspunt bouwen ze expliciet een kwantummechanica met alleen reële getallen. De reële en imaginaire delen van de gebruikelijke amplitudes worden meegenomen als extra reële boekhouding — het artikel noemt dit een „vlag" die aan elk systeem hangt — en de onmeetbare globale fase van de complexe theorie wordt in de reële theorie een even onmeetbare rotatie. De prijs verschijnt precies waar het resultaat uit 2021 haar had gelokaliseerd: in de manier waarop systemen worden gecombineerd. De naïeve manier om deze reële beschrijvingen aan elkaar te koppelen levert niet eens een eenduidig voorschrift op. De constructie groepeert daarom beschrijvingen die dezelfde fysica voorstellen en werkt met die equivalentieklassen. Met die combinatieregel reproduceert de reële theorie elke verwachtingswaarde die de complexe theorie voorspelt — voor één systeem én voor vele systemen die over gescheiden partijen zijn verstrengeld. De auteurs laten bovendien zien dat de constructie in wezen uniek is en equivalent aan standaardkwantummechanica.

De meerpartijenexperimenten kunnen deze reële theorie dus niet onderscheiden van de complexe, omdat beide voor elke voorspelling overeenkomen. De eerdere experimenten faalden niet; ze testten simpelweg tegen een andere, restrictievere reële theorie.

Waarom dit geen tegenspraak is

Het zou verleidelijk zijn dit te lezen als „de experimenten uit 2021 waren fout". Het tegendeel is waar. De experimenten waren correct, en dit artikel hangt er juist van af dat ze correct waren: het accepteert alle gemeten correlaties en laat zien dat een reële formulering die eveneens kan produceren. Wat wordt herzien is de interpretatie — de sprong van „deze reële theorie is gefalsifieerd" naar „reële getallen zijn onmogelijk in kwantummechanica". In die sprong werd de aanname overgeslagen die het eigenlijke werk deed.

Evenmin betoogt het artikel dat iemand complexe getallen zou moeten verlaten. De samenvatting van de auteurs is aan beide kanten voorzichtig: complexe getallen zijn niet strikt noodzakelijk, en ze zijn zeer nuttig. De reële constructie heeft voor elk systeem een extra vlag nodig en een subtielere regel om systemen te combineren; complexe getallen pakken dat allemaal samen in één nette rekenstructuur. Gemak is niet onbelangrijk. In de fysica is het vaak precies de reden waarom een formalisme wint.

Waarom het ertoe doet

De interessante vraag eronder is wat het woord „noodzakelijk” betekent in een fysische theorie. Een experiment kan twee theorieën van elkaar onderscheiden wanneer ze verschillende dingen voorspellen. Het kan op zichzelf niet aantonen dat één bepaald wiskundig ingrediënt de enige mogelijke verpakking voor een verzameling voorspellingen is — dat is een vraag over welke theorieën überhaupt kunnen bestaan, en die wordt beslist door constructie, niet door meting. Dit artikel levert zo’n constructie: het toont expliciet het alternatief waarvan men dacht dat de experimenten het hadden uitgesloten.

Het resultaat scherpt ook een onderscheid aan dat breder nuttig is. „Deze theorie is gefalsifieerd” en „dit wiskundige hulpmiddel is onvermijdelijk” zijn verschillende uitspraken, en precies in de ruimte ertussen kan een helder experimenteel resultaat veranderen in een overclaim. Complexe getallen blijven de natuurlijke en efficiënte taal van de kwantummechanica. Of ze metafysisch noodzakelijk zijn, is een andere vraag — en daarop is het antwoord voorlopig nee.

Heldere samenvatting

Een voorstel uit 2021 en experimenten uit 2022 lieten zien dat een kwantummechanica met alleen reële getallen, gebouwd op de standaard tensorproductregel voor het combineren van systemen, andere en toetsbare voorspellingen doet dan complexe kwantummechanica; de experimenten vielen uit in het voordeel van de complexe theorie. Dat werd breed gebracht als bewijs dat imaginaire getallen fysiek noodzakelijk zijn. Het nieuwe artikel in *Physical Review Letters* construeert een kwantummechanica met reële getallen op basis van een ander, op lokaliteit gebaseerd postulaat, die alle voorspellingen van de complexe theorie reproduceert — inclusief de meerpartijentests. Daarmee blijken complexe getallen handig maar niet strikt noodzakelijk. Het is een theoretische constructie, het draait de eerdere experimenten niet terug en het pleit er niet voor om de kwantummechanica in de praktijk anders te formuleren.

Zonder omwegen

Wat het artikel laat zien: Dat een intern consistente formulering van kwantummechanica die alleen reële getallen gebruikt alle voorspellingen van de standaard complexe theorie kan reproduceren, inclusief meerpartijenexperimenten van het Bell-type, wanneer zij wordt gebouwd op een lokaliteitspostulaat in plaats van op de tensorproductregel voor het combineren van systemen.

Wat plausibel is maar niet het punt: Dat dit de resultaten uit 2021–2022 „weerlegt”. Dat doet het niet. Het accepteert die experimenten als correct en herinterpreteert hun reikwijdte: ze sloten één specifieke reële theorie uit, namelijk degene die de tensorproductregel behoudt, niet reële getallen in principe.

Wat het niet laat zien: Dat complexe getallen fout, nutteloos of in de praktijk overbodig zijn — het artikel noemt ze expliciet zeer nuttig. Het is evenmin een nieuw experiment: er zijn geen nieuwe data gemeten; de claim bestaat uit een wiskundige constructie en een consistentiebewijs.

Belangrijkste beperkingen voor een algemene lezer: Het argument draait om welke aanname je fysisch fundamenteler vindt — de tensorproductregel of het lokaliteitspostulaat. Dat is een beargumenteerde keuze binnen een lopend debat over de grondslagen, geen feit dat door meting is vastgelegd, en de reële constructie is aantoonbaar minder natuurlijk dan de complexe formulering die zij nabootst.

Hoeveel vertrouwen moet een algemene lezer hebben? Hoog dat de constructie wiskundig consistent is — het artikel is peer-reviewed en de logica ervan kan worden gecontroleerd. De betrouwbare conclusie is de bescheiden versie: complexe getallen zijn de handige taal van de kwantummechanica, niet een bewezen metafysische noodzaak. Behandel elke kop in de trant van „imaginaire getallen zijn echt” als precies de slogan die dit artikel wil corrigeren.

Bronnen

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