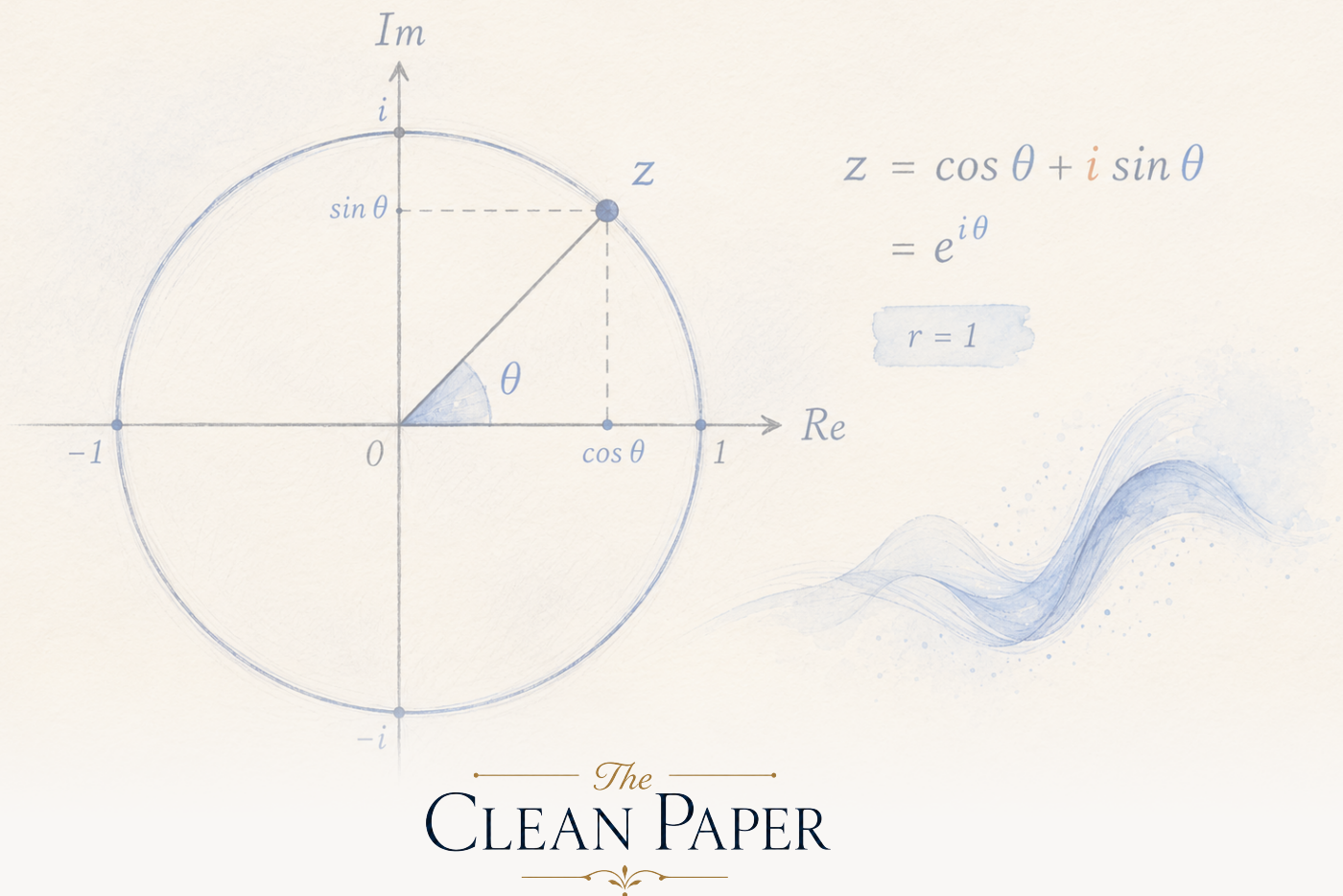




WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Kvantemekanikken kan formuleres udelukkende med reelle tal — udfordringen ligger i, hvordan systemer kombineres

I 2021 hævdede et meget omtalt resultat, at en version af kvantemekanikken med reelle tal kunne falsificeres eksperimentelt, og opfølgende eksperimenter i 2022 stemte overens med kompleks standardkvanteteori. Dette blev ofte fremstillet i overskrifter som et bevis på, at imaginære tal er fysisk reelle. En ny artikel i *Physical Review Letters* præciserer påstanden: Hvis formuleringen med reelle tal bygges på en anden, muligvis mere fysisk antagelse om, hvordan separate systemer kombineres, gengiver den enhver forudsigelse fra kompleks kvantemekanik, inklusive flerparsystemtestene. Den ærlige fortolkning er, at komplekse tal er praktiske snarere end strengt nødvendige — og at de tidligere eksperimenter udelukkede én bestemt reel teori, ikke reelle tal i princippet. Det er et teoretisk resultat om kvantemekanikkens grundlag, ikke en ny måling, og det beder ingen om at holde op med at bruge komplekse tal.

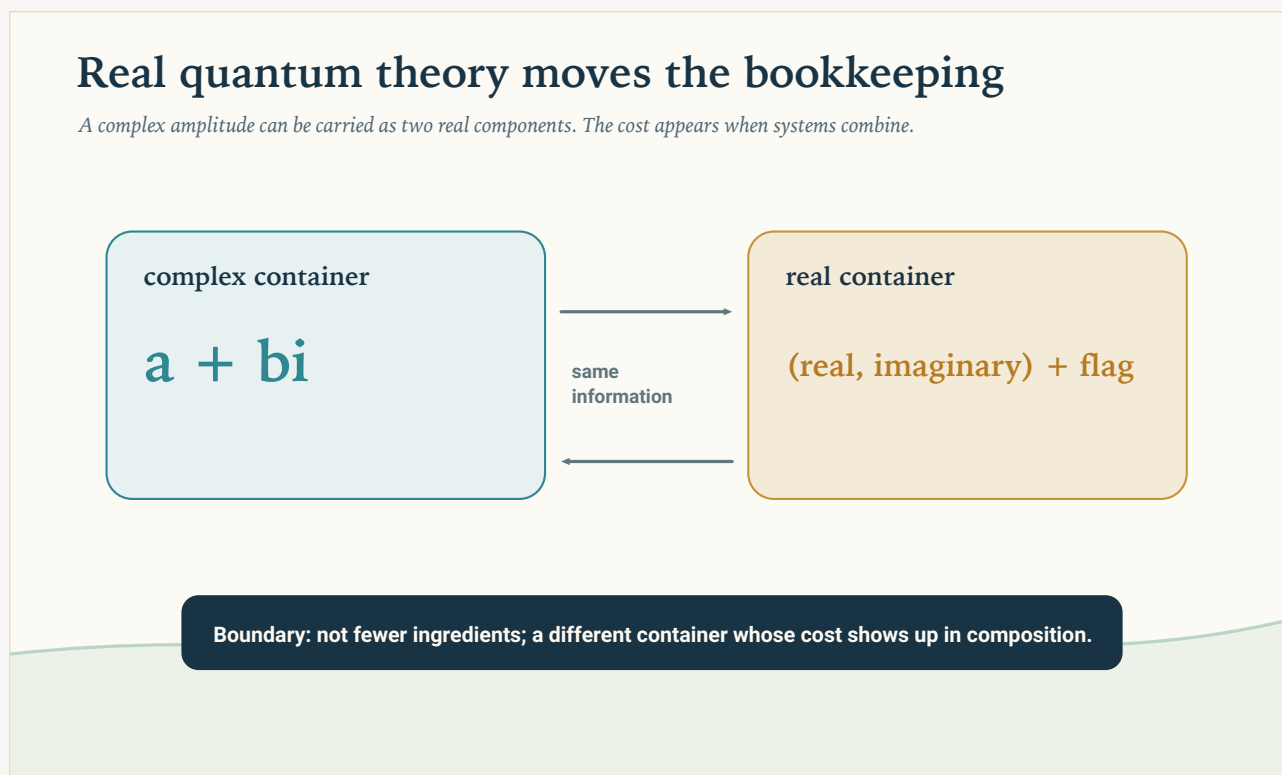
Written by Vera Rubin · Cross-checked by Lucio Vaglio · AI-assisted, human-reviewed

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

En overskrift, der er værd at læse igen

For nogle år siden fik en opsigtsvækkende påstand stor udbredelse: Eksperimenter havde vist, at imaginære tal er fysisk reelle, og at kvantemekanikken ikke kan formuleres uden dem. Påstanden udsprang af reel, omhyggelig fysik — et forslag fra 2021 i *Nature* af Marc-Olivier Renou og kolleger samt eksperimenter i 2022, der førte det ud i livet. Men den populære version pressede et præcist udsagn sammen til et slogan, og sloganet var stærkere end resultatet.

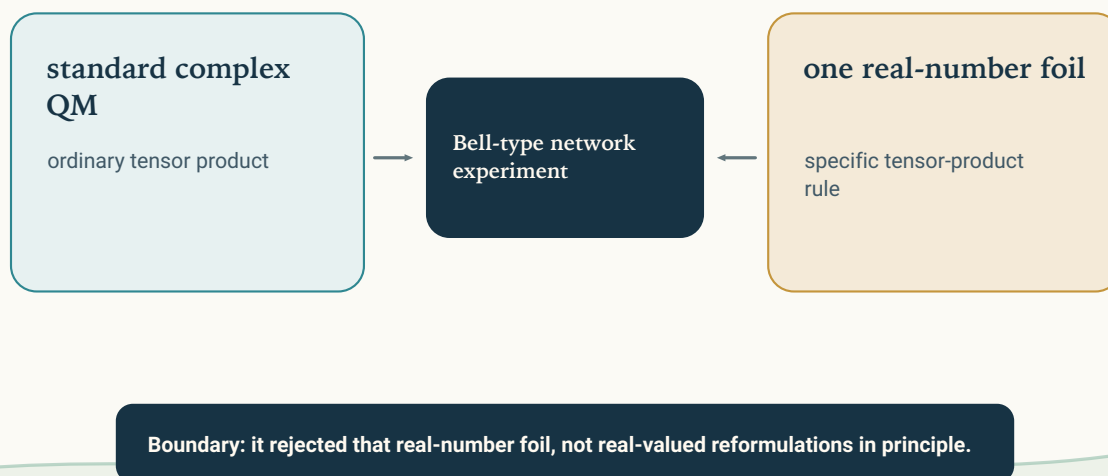
En ny artikel i *Physical Review Letters* af Pedro Barrios Hita, Anton Trushechkin, Hermann Kampermann, Michael Epping og Dagmar Bruß sætter det præcise udsagn på plads igen. Den konstruerer en version af kvantemekanikken, som kun bruger reelle tal og gengiver enhver forudsigelse fra den komplekse standardteori — inklusive netop de flerpertseksperimenter, som angiveligt udelukkede reelle tal. Tricket er ikke at smugle imaginære tal ind igen. Det er at ændre én antagelse om, hvordan separate systemer kombineres. Den ærlige konklusion er, med forfatterens egne ord, at komplekse tal ikke er nødvendige for at beskrive kvantemekanikken, men at de bestemt er meget nyttige.



En kompleks amplitude $a+bi$ er et par reelle tal med et "flag", som følger med hvert system. Den reelle formulering har ikke færre bestanddele — kun en anden beholder, hvor omkostningen viser sig i måden, systemer kombineres på.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

What the 2021 test actually adjudicated



Eksperimenterne i 2021–22 sammenlignede to bestemte teorier — kompleks standardkvantemekanik med en reel "kontrastteori", der beholder tensorproduktreglen — og faldt ud til fordel for den komplekse teori. De udelukkede denne kontrastteori, ikke reelle tal i princippet.

Original diagram — The Clean Paper CC BY 4.0

Hvilken rolle komplekse tal spiller i teorien

I kvantemekanikken beskrives et systems tilstand med amplituder, og for at få sandsynligheden for et udfald tager man kvadratet på amplitudens størrelse. I standardteorien er disse amplituder komplekse tal: Hver af dem har en størrelse og en fase, en vinkel. Fasen er ikke pynt. Når to veje til det samme udfald kombineres, afgør deres faser, om de forstærker eller ophæver hinanden — den interferens, der er kendetegnet på kvanteadfærd. En overordnet fase, som hele systemet har til fælles, kan derimod aldrig måles.

Et komplekst tal er i virkeligheden blot et par reelle tal — en realdel og en imaginærdel — samlet med bestemte regler for, hvordan de multipliceres. Et naturligt spørgsmål er derfor, om denne indpakning er afgørende. Kan man beholde de to reelle tal, droppe den komplekse indpakning og stadig få hele kvantemekanikken med? Multiplikationsreglerne er det, der gør komplekse tal til mere end to tal ved siden af hinanden, så svaret er ikke indlysende, og det er her, nuancen ligger.

Hvad resultatet fra 2021 faktisk fastslog

Renou og kolleger stillede netop dette spørgsmål og gav det en skarp, testbar form. De spurgte ikke, om reelle tal overhovedet kan optræde i kvanteteori; de spurgte, om en formulering med reelle tal kunne matche alle den komplekse teoris forudsigelser under en bestemt regel for at kombinere systemer. Denne regel — lad os kalde den tensorproduktreglen — er standardmetoden til at beskrive flere uafhængige dele som én helhed.

Under denne regel fandt de et scenarie, hvor tre parter deler sammenfiltrering fra to uafhængige kilder, og hvor en teori med reelle tal og den komplekse teori forudsiger forskellige, målbare korrelationer — en flerpartersversion af en Bell-test. I 2022 blev sådanne test udført i eksperimenter med superledende kredsløb og med fotoner. De målte korrelationer stemte overens med kompleks kvantemekanik og var uforenelige med det reelle alternativ.

Hvorfor testen kræver to kilder, ikke én

En almindelig Bell-test bruger én kilde, som sender ét sammenfiltret par til to personer, Alice og Bob. I denne opstilling kan en kvantemekanik med reelle tal gengive præcis de samme korrelationer som den komplekse teori — de to kan ikke skelnes fra hinanden, så én kilde kan ikke afgøre sagen.

Argumentet fra 2021 får fat ved at tilføje en anden, **uafhængig** kilde. Forestil dig tre parter på en linje: Alice, Bob, Charlie. Én kilde sammenfiltrer Alice med Bob; en separat kilde, uden nogen fælles fortid, sammenfiltrer Bob med Charlie. Bob sidder i midten og måler sine to partikler samlet, så de to halvdele forbindes. Det er de to kilders *uafhængighed* — antagelsen om, at de blev forberedt hver for sig — der gør arbejdet: Under standardreglen for tensorprodukter ved kombination af uafhængige systemer kan en teori med reelle tal ikke matche de trepartskorrelationer, som kompleks kvantemekanik forudsiger for dette netværk, mens en test med én kilde lader de to teorier stå lige. Det var denne forskel, eksperimenterne målte.

Det er et reelt og klart resultat. Men læg nøje mærke til, hvad der blev sammenlignet: kompleks standardkvanteteori med én bestemt reel teori — den, som beholder den almindelige tensorproduktregel. Det er denne kombination, ikke reelle tal som sådan, eksperimenterne afgjorde mellem. Den nye artikel låner et begreb fra forskningen i kvantemekanikkens grundlag og kalder det udelukkede alternativ, hvad det er: en *kontrastteori* — en teori, som ingen hævder er sand, men som opstilles som en bevidst kontrast til den accepterede teori, så eksperimenter kan skelne de to fra hinanden. Hele dens værdi ligger i, at den kan skelnes ud: Når kontrastteorien udelukkes, viser det, hvilke af den reelle teoris antagelser der gjorde arbejdet.

Hvad den nye artikel ændrer

Det nye arbejde beholder næsten alt og ændrer ét postulat. I stedet for at forudsætte tensorproduktreglen, når systemer kombineres, tager det udgangspunkt i et lokalitetskrav, som forfatterne argumenterer for er mere fysisk grundlæggende: En operation, der kun udføres på ét delsystem, bør ikke have nogen målbar virkning på et andet, uberørt delsystem.

Fra dette udgangspunkt opbygger de eksplicit en kvantemekanik med reelle tal. De sædvanlige amplituders real- og imaginærdele føres med som ekstra bogføring i reelle tal — artiklen kalder det et “flag”, der er knyttet til hvert system — og den komplekse teoris ikke-observerbare globale fase bliver til en lige så ikke-observerbar rotation i den reelle teori. Prisen viser sig præcis dér, hvor resultatet fra 2021 placerede den: i måden, systemer kombineres på. Den naive måde at sætte disse reelle beskrivelser sammen på giver ikke engang en veldefineret fremgangsmåde, så konstruktionen grupperer i stedet beskrivelser, der repræsenterer den samme fysik, og arbejder med disse klasser. Med denne kombinationsregel gengiver den reelle teori enhver forventningsværdi, som den komplekse teori forudsiger — for ét system og for mange, sammenfiltret på tværs af adskilte parter. Forfatterne viser også, at konstruktionen i det væsentlige er entydig og ækvivalent med standardkvantemekanikken.

Flerpartseksperimenterne kan derfor ikke skelne denne reelle teori fra den komplekse, fordi de to er enige om enhver forudsigelse. De tidligere eksperimenter slog ikke fejl; de testede blot mod en anden, mere begrænset reel teori.

Hvorfor dette ikke er en modsigelse

Det ville være let at læse dette som, at “eksperimenterne fra 2021 tog fejl”. Det modsatte er tilfældet. Eksperimenterne var korrekte, og denne artikel er afhængig af, at de var korrekte: Den accepterer enhver målt korrelation og viser en reel formulering, som også frembringer dem. Det, der revideres, er fortolkningen — springet fra “denne reelle teori er falsificeret” til “reelle tal er umulige i kvantemekanikken”. Det spring overså den antagelse, der gjorde arbejdet.

Artiklen argumenterer heller ikke for, at nogen bør opgive komplekse tal. Dens egen opsummering er forsigtig i begge retninger: Komplekse tal er ikke strengt nødvendige, og de er meget nyttige. Den reelle konstruktion kræver et ekstra flag på hvert system og en mere raffineret regel for at kombinere dem; de komplekse tal pakker alt dette ind i ét elegant stykke matematik. Bekvemmelighed er ikke ligegyldig. I fysikken er den ofte hele grunden til, at en formalisme vinder frem.

Hvorfor det er vigtigt

Det interessante underliggende spørgsmål er, hvad ordet “nødvendig” betyder for en fysisk teori. Et eksperiment kan skelne mellem to teorier, når de forudsiger forskellige ting. Det kan ikke i sig selv fortælle dig, at en bestemt matematisk bestanddel er den eneste mulige beholder for et sæt

forudsigelser — det er et spørgsmål om, hvilke teorier der findes, og det afgøres ved konstruktion, ikke måling. Denne artikel er en konstruktion: Den fremviser det alternativ, som eksperimenterne blev antaget at have udelukket.

Resultatet skærper også en sontring, som generelt er værd at holde fast i. “Denne teori er falsificeret” og “dette matematiske værktøj er uundgåeligt” er forskellige udsagn, og mellemrummet mellem dem er netop dér, hvor et klart eksperimentelt resultat kan blive til en overdreven påstand. Komplekse tal er fortsat kvantemekanikkens naturlige og effektive sprog. Om de er metafysisk nødvendige, er et særskilt spørgsmål, og på det spørgsmål er svaret indtil videre nej.

Kort fortalt

Et forslag fra 2021 og eksperimenter i 2022 viste, at en kvantemekanik med reelle tal, som bygger på standardreglen for tensorprodukter ved kombination af systemer, giver andre, testbare forudsigelser end kompleks kvantemekanik, og eksperimenterne faldt ud til fordel for den komplekse teori. Dette blev ofte omtalt som et bevis på, at imaginære tal er fysisk nødvendige. Den nye artikel i *Physical Review Letters* konstruerer en kvantemekanik med reelle tal ud fra et andet, lokalitetsbaseret postulat, som gengiver alle den komplekse teoris forudsigelser, inklusive flerpartstestene — og viser dermed, at komplekse tal er praktiske snarere end strengt nødvendige. Det er en teoretisk konstruktion, den omstøder ikke de tidligere eksperimenter, og den opfordrer ingen til at omformulere kvantemekanikken i praksis.

Kontrol uden omsvøb

Hvad artiklen viser: At en selvkonsistent formulering af kvantemekanikken, som kun bruger reelle tal, kan gengive enhver forudsigelse fra den komplekse standardteori, inklusive flerparts Bell-type-eksperimenter, hvis den bygger på et lokalitetspostulat i stedet for tensorproduktreglen for at kombinere systemer.

Hvad der kan lyde rimeligt, men ikke er pointen: At dette “modbeviser” resultaterne fra 2021–2022. Det gør det ikke. Det accepterer eksperimenterne som korrekte og nyfortolker deres rækkevidde: De udelukkede én bestemt reel teori, den, der beholder tensorproduktreglen, ikke reelle tal i princippet.

Hvad den ikke viser: At komplekse tal er forkerte, ubrugelige eller værd at droppe i praksis — artiklen kalder dem udtrykkeligt meget nyttige. Det er heller ikke et nyt eksperiment: Ingen data blev målt; påstanden er en matematisk konstruktion og et konsistensbevis.

De vigtigste begrænsninger for en almen læser: Argumentet afhænger af, hvilken antagelse man betragter som mere fysisk grundlæggende — tensorproduktreglen eller lokalitetspostulatet. Det er et begrundet valg i en igangværende debat om kvantemekanikkens grundlag, ikke et faktum, der er fastlagt ved måling, og den reelle konstruktion kan hævdes at være mindre naturlig end den komplekse konstruktion, den matcher.

Hvor stor tillid bør en almen læser have? Stor tillid til, at konstruktionen er matematisk konsistent — den er fagfællebedømt, og dens logik kan efterprøves. Den konklusion, man kan stole på, er den beskedne: Komplekse tal er kvantemekanikkens praktiske sprog, ikke en bevist metafysisk nødvendighed. Betragt enhver overskrift af typen “imaginære tal er virkelige” som netop det slogan, denne artikel blev skrevet for at korrigere.

Kilder

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>